



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# 중속디젤기관 분사노즐 형상변경에 따른 분사성능에 관한 연구

A Study on The Injection Performance of Injection Valve for  
Medium-Speed Diesel Engines with Hole Geometry Variation



2013년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

김 주 연

本 論文을 金周連의 工學碩士 學位論文으로  
認准함.

위 원 장 최 재 성 (인)

위 원 조 권 회 (인)

위 원 박 권 하 (인)



2012년 12월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of tables .....	iii
List of figures .....	iv
Abstract .....	vii

## 제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 및 내용 .....	3

## 제 2 장 분사 특성에 대한 실험적 고찰

2.1 실험장치 및 실험 조건 .....	4
2.1.1 분사 실험장치 및 조건 .....	4
2.1.2 연속유량 실험장치 및 조건 .....	11
2.2 실험결과 및 고찰 .....	13
2.2.1 분사 특성 실험 .....	13
2.2.2 연속 유량 실험 .....	21
2.2.3 분무 특성 실험 .....	22
2.3 실험결과 요약 .....	27

## 제 3 장 분사특성에 대한 계산적 고찰

3.1 수학적 모델 및 계산 조건 .....	28
3.2 니들이 없는 경우 노즐 출구 각도에 따른 계산 결과 및 고찰.....	31
3.2.1 유속 및 유량의 변화 .....	33



3.2.2 압력의 변화 .....	37
3.2.3 계산 결과 요약.....	43
3.3 니들이 있는 경우 노즐 출구 각도에 따른 계산 결과 및 고찰....	44
3.3.1 압력의 변화 .....	46
3.3.2 유속 및 유량의 변화 .....	54
3.3.3 계산 결과 요약.....	64
3.4 노즐 곡률반경의 크기에 따른 계산 결과 및 고찰 .....	65
3.4.1 압력의 변화 .....	67
3.4.2 유속 및 유량의 변화 .....	75
3.4.3 계산 결과 요약 .....	85
 제 4 장 결 론 .....	 86
참고 문헌 .....	90



## List of tables

Table 1 Properties of diesel.....	4
Table 2 Test conditions .....	9
Table 3 Specification of flow rate measuring system .....	11
Table 4 Boundary conditions .....	28
Table 5 List of symbols .....	29



## List of figures

Fig. 2.1 Experimental setup .....	5
Fig. 2.2 Pressure and gap sensor .....	6
Fig. 2.3 DC Motor and controller .....	6
Fig. 2.4 Injection system .....	7
Fig. 2.5 Data acquisition system .....	7
Fig. 2.6 High speed camera .....	8
Fig. 2.7 High speed imaging setup .....	8
Fig. 2.8 Photos. of nozzle and nozzle section .....	9
Fig. 2.9 Nozzle shapes with exit angle variation .....	10
Fig. 2.10 Photo. of flow rate measuring system .....	11
Fig. 2.11 Test section of the measuring system .....	12
Fig. 2.12 Data sheet of the measuring system .....	12
Fig. 2.13 Variations of injection pressure and needle lift at cam shaft speed 300rpm .....	14
Fig. 2.14 Variations of injection pressure and needle lift at cam shaft speed 400rpm .....	16
Fig. 2.15 Variations of injection pressure and needle lift at cam shaft speed 500rpm .....	18
Fig. 2.16 Variation of mass flow rate in each exit angle of nozzle hole at 300, 400, 500rpm .....	19
Fig. 2.17 Variation of needle closing time in each exit angle of	

nozzle hole at 300, 400, 500rpm .....	20
Fig. 2.18 Variation of mass flow rate in each exit angle of nozzle hole .....	21
Fig. 2.19-1 Spray Photo. at 300rpm .....	23
Fig. 2.19-2 Spray Photo. at 400rpm .....	24
Fig. 2.19-3 Spray Photo. at 500rpm .....	25
Fig. 2.20 Spray angles with exit angle variation .....	26
Fig. 2.21 Spray widths with exit angle variation .....	26
Fig. 3.22 Boundary condition .....	29
Fig. 3.23 Hole exit geometry and calculation grids .....	32
Fig. 3.24 Variations of outlet flow velocity and mass flow rate at each exit angle of nozzle hole .....	35
Fig. 3.25 Graph of outlet flow velocity in each exit angle of nozzle hole .....	36
Fig. 3.26 Graph of outlet mass flow rate in each exit angle of nozzle hole .....	36
Fig. 3.27 Variation of passage pressure in each exit angle of nozzle hole .....	39
Fig. 3.28 Graph of passage pressure in each exit angle of nozzle hole .....	39
Fig. 3.29 Variation of outlet pressure in each exit angle of nozzle hole .....	42
Fig. 3.30 Graph of outlet pressure in each exit angle of nozzle hole .....	42

Fig. 3.31 Hole exit geometry and calculation grids .....	45
Fig. 3.32 Variation of passage pressure in each exit angle of nozzle hole .....	48
Fig. 3.33 Graph of passage pressure in each exit angle of nozzle hole .....	48
Fig. 3.34 Variation of outlet pressure in each exit angle of nozzle hole .....	51
Fig. 3.35 Graph of outlet pressure in each exit angle of nozzle hole .....	51
Fig. 3.36 Variation of negative pressure in each exit angle of nozzle hole .....	54
Fig. 3.37 Variation of passage flow velocity in each exit angle of nozzle hole .....	56
Fig. 3.38 Graph of passage flow velocity in each exit angle of nozzle hole .....	57
Fig. 3.39 Variations of outlet flow velocity and mass flow rate in each exit angle of nozzle hole .....	59
Fig. 3.40 Graph of outlet flow velocity in each exit angle of nozzle hole .....	60
Fig. 3.41 Graph of outlet mass flow rate in each exit angle of nozzle hole .....	60
Fig. 3.42 Variation of outlet flow vector in each exit angle of nozzle hole .....	63
Fig. 3.43 Curvature radius geometry and calculation grids .....	

Fig. 3.44 Variation of passage pressure in each curvature radius at nozzle .....	69
Fig. 3.45 Graph of passage pressure in each curvature radius at nozzle .....	69
Fig. 3.46 Variation of outlet pressure in each curvature radius at nozzle .....	72
Fig. 3.47 Graph of outlet pressure in each curvature radius at nozzle .....	72
Fig. 3.48 Variation of negative pressure in each curvature radius at nozzle .....	75
Fig. 3.49 Variation of passage flow velocity in each curvature radius at nozzle .....	77
Fig. 3.50 Graph of passage flow velocity in each curvature radius at nozzle .....	78
Fig. 3.51 Variations of outlet flow velocity and mass flow rate in each curvature radius at nozzle .....	80
Fig. 3.52 Variation of outlet flow velocity in each curvature radius at nozzle .....	81
Fig. 3.53 Variation of outlet mass flow rate in each curvature radius at nozzle .....	81
Fig. 3.54 Variation of flow vector in each curvature radius at nozzle .....	

# A Study on The Injection Performance of Injection Valve for Medium-Speed Diesel Engines with Hole Geometry Variation

Ju Youn Kim

Department of Mechanical Engineering

*Graduate School of  
Korea Maritime University*



Abstract

Emission regulations have been strengthened step by step for marine engines. The measure is required both inside and outside of the combustion chamber. The combustion characteristics in cylinder has a close relationship with the exhaust emission characteristics.

Injection valve and nozzle hole geometry is an important factor for combustion. The studies improve the spray characteristics of nozzle have concentrated on nozzle inlet geometry and nozzle hole diameter, but the exit

geometry has not been studied.

First chapter is the outline of this study.

In second chapter, injection characteristics were tested when the nozzle hole exit angle varied from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ . The injection pressure, duration and spray shapes were obtained with pressure transducer, needle lift sensor and high speed camera. The experimental results show that the injection pressure in  $0^\circ$  case is higher than that in  $60^\circ$ , and the needle lift closing times are earlier in the  $30^\circ$  and  $60^\circ$  cases than in the other cases. The flow rates in  $30^\circ$  and  $60^\circ$  are the higher than those in the other cases. Spray test result shows  $30^\circ$  and  $60^\circ$  cases have large spray angle and width.

Third chapter is the simulation study on the nozzle hole geometry, Exit angles of  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  and nozzle curvature radii of 0mm, 0.1mm, 0.15mm, 0.2mm were tested. The number of nozzle grids were 2,500,000 and SST model was used at turbulence model. The simulation results show the exit angles of  $30^\circ$  and  $60^\circ$  and curvature radii of 0.15mm and 0.2mm have more effective characteristics than the other cases.

The chapter four is a conclusion. The experimental and calculative results are summarized.



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

디젤기관은 현재 사용되는 어떠한 내연 기관 보다 높은 열효율을 가지고 있으며 사회 전반적으로 가솔린 기관과 함께 가장 많이 사용되는 기관이다. 특히 큰 출력을 요구하는 대형 트럭이나, 건설 장비, 선박, 발전용 및 산업용으로 널리 쓰이며 현재는 디젤 기술이 많이 발달되었기 때문에 중소형 차량용으로 공급 되고 있다. 하지만 디젤기관은 가솔린 기관과 함께 국내에서는 대기 환경 보전법에 의하여 규제를 받고 있으며 해양에서는 선박 으로부터 해양오염방지에 관한 국제협약(MARPOL)에 의하여 규제를 받고 있다. 특히 질소산화물과 매연미립자의 배출에 대한 규제는 매우 강화되고 있다. 강화되는 배기규제를 만족하기 위하여 연소에 매우 중요한 역할을 하는 연료 분사에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

윤<sup>1)</sup>은 연료분사 노즐 형상이 선박용 중형 디젤기관의 질소산화물( $\text{NO}_x$ )에 미치는 영향에 대하여 연구 하였는데, 노즐 홀 지름 및 개수가 증가할수록 연료 소비율은 증가하고  $\text{NO}_x$  발생량은 감소하여 연료 분사 노즐 홀 지름을 바꾸는 것이 노즐 홀 개수를 바꾸는 것 보다  $\text{NO}_x$  개선에 효과적임을 강조 하였다. 김<sup>2)</sup>은 이중제트에서 노즐과 노즐 사이의 각도 변화에 따른 유동 특성에서 난류강도가 증가하는 원인은 유입과 상호 간섭 때문이며 노즐 사이의 각도가 작아질수록 난류 에너지가 크다는 연구를 하였다. 차<sup>3)</sup>는 분사 노즐 분공경에 따른 디젤기관 연소실내 분무 거동에 관한 연구에서 노즐 분공경 축소는 연료 미립화 및 공연비(A/F) 증대 등을 유발하여 매연과 연비를 향상 시킬 수 있음을 수치 해석 결과와 성능 실험 결과를 통해 발견 하였다. 연료분무 자체의 거시적인 특성인 분무도달거리, 분무각 등과 미

시적인 특성인 연료 액적 입자의 크기 및 속도는 상부조건 즉 노즐 형상과 노즐 내부의 유동현상에 큰 영향을 받기 때문에 노즐 내부유동 현상이 연료분무의 미립화에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 디젤 기관의 인젝터에서 일어나는 캐비테이션 현상 및 노즐 내부에서 발생하는 난류운동을 관찰하고자 하는 연구 또한 진행되고 있다<sup>4-14)</sup>. 한<sup>15)</sup>은 노즐 형상비에 따른 캐비테이션 및 내부 유동 특성에 관한 수치적 연구에서 캐비테이션 크기를 노즐 직경과 길이(L/D)를 이용하여 효율적으로 제어하면 노즐 출구에서의 액적분열 및 미립화에 보다 좋은 영향을 미칠 수 있다는 연구를 하였고, 박<sup>16)</sup>은 노즐 오리피스 형상 및 형상비가 디젤과 바이오디젤 연료의 노즐 내부 및 외부 유동특성에 미치는 영향에서 형상비가 작을수록 낮은 분사압력에서 캐비테이션이 생성되어 분사된 연료의 미립화를 촉진시키며, 형상비가 커지면서 캐비테이션 시작 유동의 유량계수가 작아짐을 확인하였다.

디젤기관의 분무 특성은 혼합기 형성, 연소 및 배출물 형성에 중요한 영향을 미친다. 노즐의 유동은 3차원 특성을 가지고 있으므로 실험만으로는 가시화가 용이 하지 않다. 이에 수치해석적 시뮬레이션을 이용하여 노즐 내부 뿐만 아니라 가시화하기 힘든 부분 즉, 실험으로 측정이 곤란한 영역을 파악할 수 있으므로 국내외로 많은 연구가 진행되고 있다<sup>17-25)</sup>. 이러한 이유로 최근에 캐비테이션이 발생하는 디젤 인젝터 내부의 형상 및 운전 조건에 따른 영향을 분석하기 위해 3차원 해석에 의한 연구가 증대되고 있다. 이러한 많은 연구에도 불구하고 노즐 출구의 형상에 대한 연구는 거의 없다. 노즐 출구의 개도각을 변화시키면 분사특성 및 디젤 분무의 거동에 큰 영향을 미칠것으로 예상된다. 본 연구에서는 노즐 입구의 형상변화와 동시에 출구의 개도각을 변화시키면서 수치해석 및 실험을 수행하였다.

## 1.2 연구 목적 및 내용

박용기관에서의 배기규제는 단계별로 강화되고 있으며 연소실 내외의 종합적인 기술의 개발이 이루어지고 있다. 기관 내부의 연소 특성은 배기배출 특성과 밀접한 관계가 있으며 연소특성에 가장 큰 영향을 미치는 부분이 분사시스템이며 특히 분사 밸브의 노즐과 노즐 홀 특성은 연소에 중요한 영향을 미친다. 노즐의 분무에 관한 연구, 노즐 오리피스 형상에 관한 연구, 노즐 직경변화에 관한 연구, 노즐 형상에 관한 연구 등이 많이 진행되고 있다. 그러나 노즐 출구의 형상에 대해서는 연구가 거의 없는 상태이다.

본 논문에서는 노즐 내부의 연료실 형상에서 출구 부분에 개도각( $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ )을 주어 노즐의 압력과 노즐 상부에서의 니들 양정 그리고 분무형상을 실험적으로 연구하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 출구 부분에서의 개도각 변화 뿐만 아니라 입구의 형상에 곡률 반경을 0.1mm, 0.15mm, 0.2mm 주어 해석을 수행하였다. 입구 조건을  $40^{\circ}\text{C}$ 의 세탄을 350bar의 압력을 주어 분석하였다. 최종적으로 실험에서 얻은 압력과 니들의 양정 그리고 분무 특성과 시뮬레이션으로 얻은 노즐의 압력, 유속, 유량, 유동 등과 같은 분사특성을 종합하여 결론을 도출하였다.

## 제 2 장 분사 특성에 대한 실험적 고찰

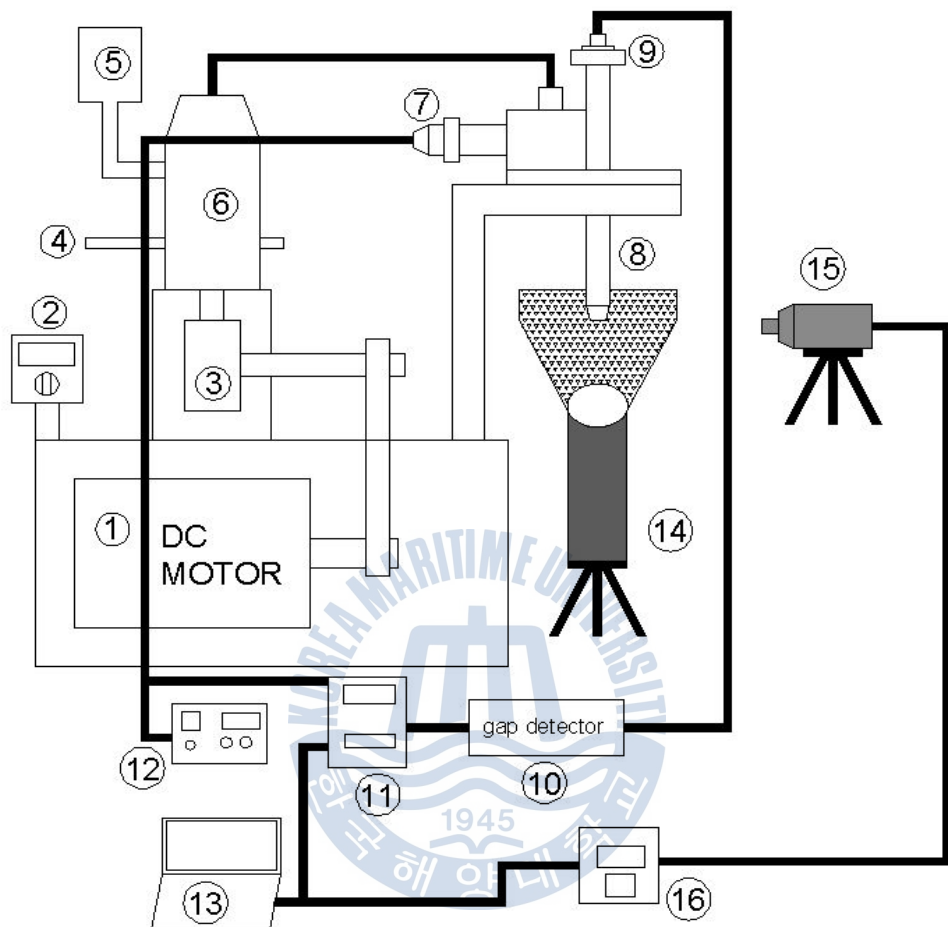
### 2.1 실험장치 및 실험 조건

#### 2.1.1 분사 실험장치 및 조건

선박용 MDT L27/38 노즐의 연료 분사특성을 실험하기 위하여 Fig.2.1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 사용 연료유는 경유를 사용하였으며 성상은 Table 1과 같다. 연료 공급은 인버터로 회전속도를 제어할 수 있는 15kW DC 모터의 회전운동을 캠으로 상하 왕복운동으로 바꾸어 분사 펌프를 작동 시키고 압력이 높아진 디젤연료가 분사 밸브로 공급되도록 구성 되었다. 데이터 취득은 압력센서와 껌 센서에서 발생하는 전압신호를 데이터 수집 장치를 통해 노트북에 설치된 LABVIEW 2010 프로그램으로 처리 하였다. 압력 취득을 위해 설치된 압력센서는 GE사의 PTX651 모델로 최대압력 1000bar 까지 측정할 수 있는 센서로 분사밸브 연료공급 직전에 설치하였으며 니들양정 측정을 위하여 니들의 상부에 연결봉을 설치하여 분사밸브의 상단 까지 니들의 움직임을 받을 수 있도록 하였으며, 분무거동을 가시화하기 위하여 Photron 사의 FASTCAM SA4 500K-M1 모델의 고속카메라를 사용하였다.

Table 1 Properties of diesel

	Density 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	Viscosity 20 °C (Cst)	Pour pt (°C)	Cloud pt (°C)	Flash pt (°C)
Diesel	0.830	6	-18	-9	70



- ① DC motor ② Rpm controller ③ Cam ④ Rack ⑤ Fuel tank  
 ⑥ Injection pump ⑦ Pressure sensor ⑧ Injection valve ⑨ Gap sensor  
 ⑩ Gap detector ⑪ Data acquisition ⑫ Power supply ⑬ Laptop  
 ⑭ Light source ⑮ High speed camera ⑯ Camera controller

Fig. 2.1 Experimental setup



Fig. 2.2 Pressure and gap sensor



Fig. 2.3 DC Motor and controller



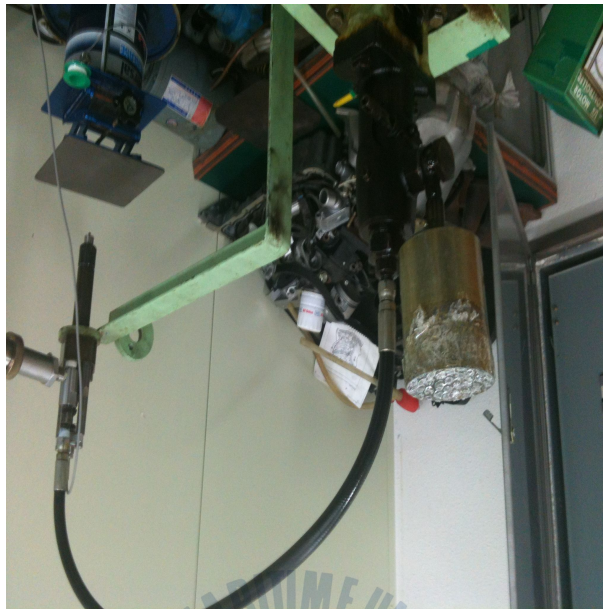


Fig. 2.4 Injection system



Fig. 2.5 Data acquisition system

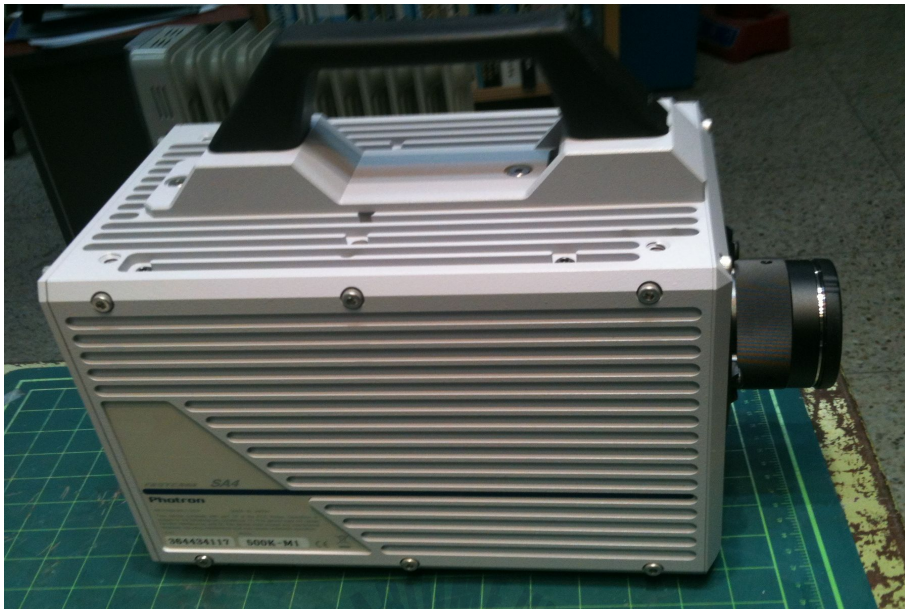


Fig. 2.6 High speed camera

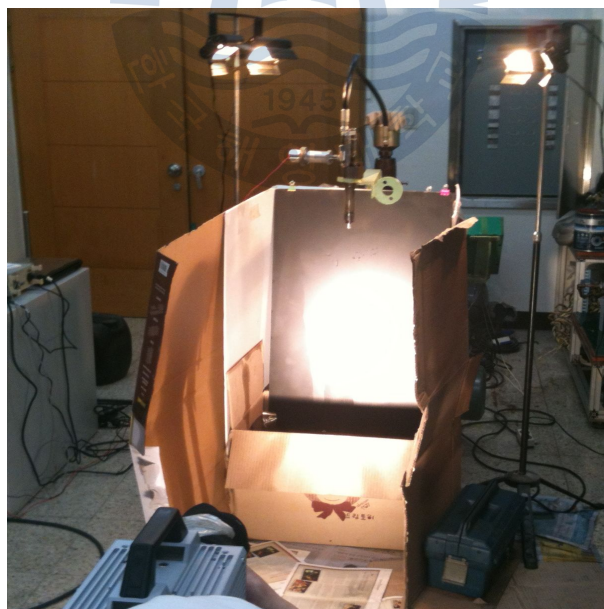


Fig. 2.7 High speed imaging setup



Table 2는 협조건을 보여준다. 노즐의 출구각도 변화에 따라 캠축의 회전속도를 300rpm, 400rpm, 500rpm의 세 가지 경우로 하였으며, 분사 펌프의 랙 위치를 19mm로 동일하게 하였고 노즐의 개방 압력도 세 가지 경우 모두 동일하게 실험을 진행 하였다.

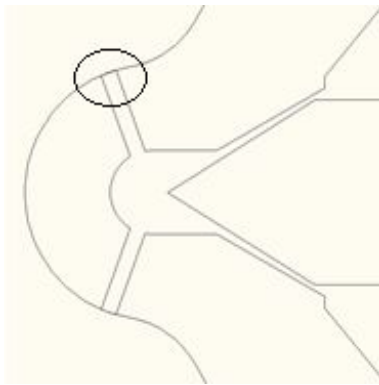
Table 2 Test conditions

Cam shaft speed (rpm)	Nozzle hole exit angle (degree)				Rack position (mm)
300	0	30	60	90	19
400	0	30	60	90	19
500	0	30	60	90	19

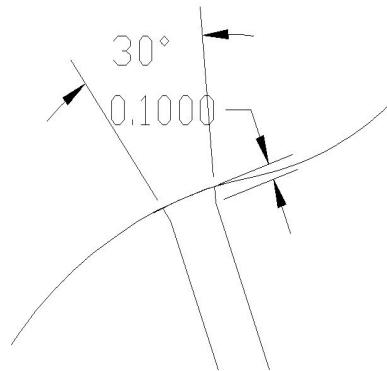
Fig.2.8 은 실험에 사용된 노즐의 사진이다. Fig. 2.9는 노즐 출구 각도가 0도, 30도, 60도, 90도 일 때의 형상을 보여 주고 있다. 기본 0도 노즐은 MDT L27/38에 사용되는 노즐로 홀 개수는 6개이다.



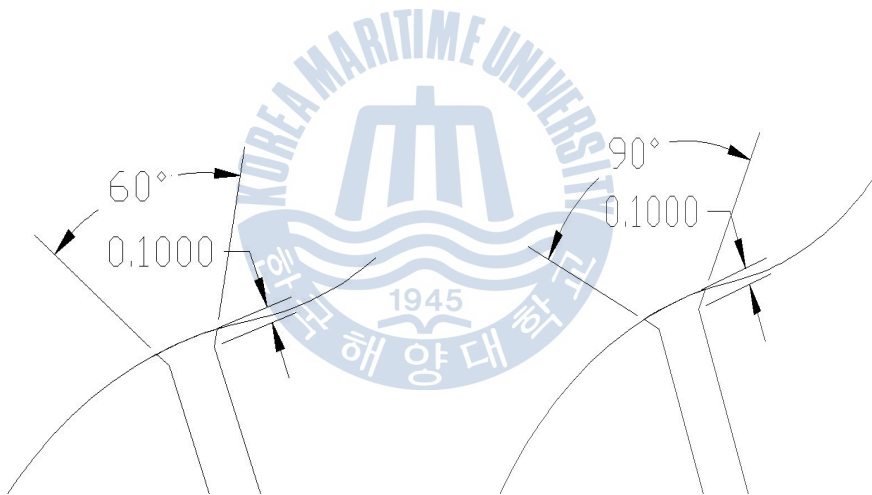
Fig. 2.8 Photos. of nozzle and nozzle section



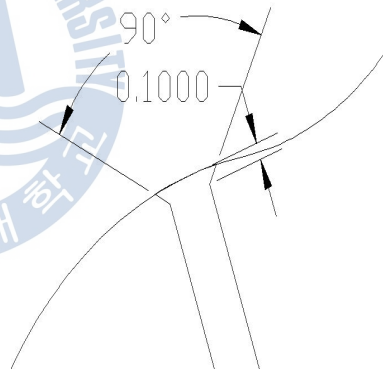
(a) 0 degree



(b) 30 degree



(c) 60 degree



(d) 90 degree

Fig. 2.9 Nozzle shapes with exit angle variation

### 2.1.2 연속유량 실험장치 및 조건

Table 3은 노즐의 니들이 없이 연속질량유량을 계측하는 실험장치의 사양을 보여준다. A사의 FM-45LM 모델로 분사압력은 100bar로 유지되며 실험 시간은 60초, 실험온도는 40℃로 유지 한다. Fig 2.10 ~ 2.12.는 A사의 유량 계측장치의 사진을 나타낸다.

Table 3 Specification of flow rate measuring system.

Equipment	Flow Rate measuring equipment
Model	FM-45LM
Test pressure	100 bar
Test time	60 sec
Test temperature	40 °C



Fig. 2.10 Photo. of mass flux measuring system

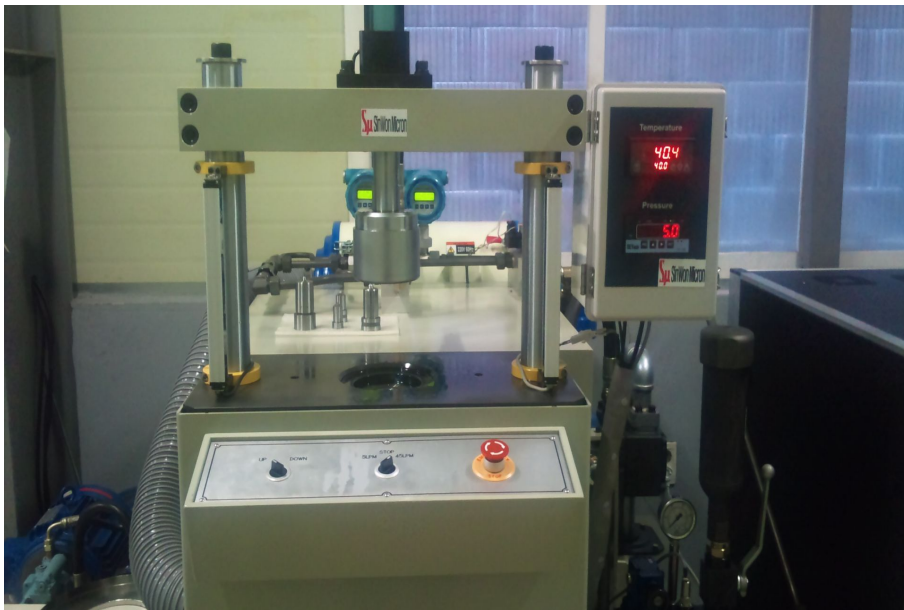


Fig. 2.11 Test section of the measuring system

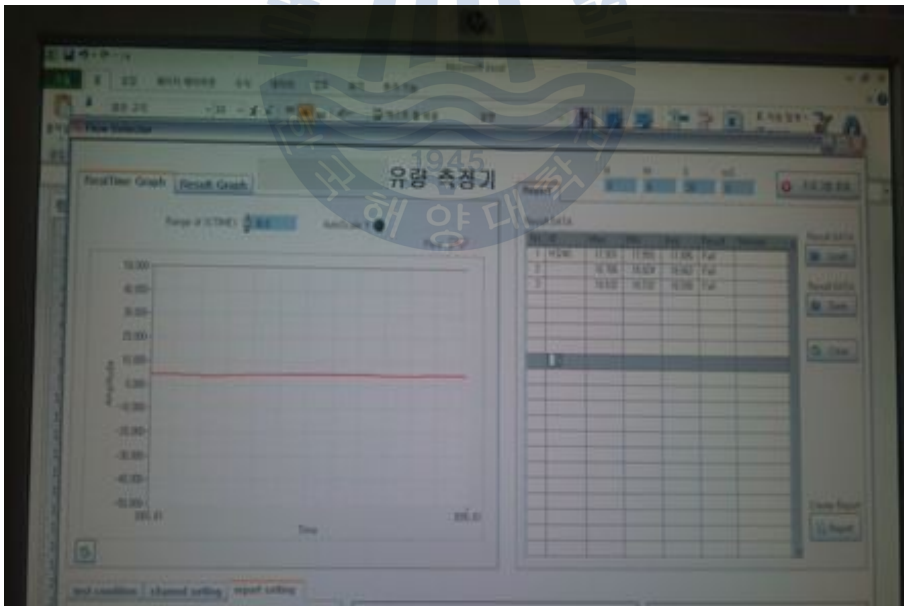


Fig. 2.12 Data sheet of the measuring system

## 2.2 실험결과 및 고찰

### 2.2.1 분사 특성 실험

Fig 2.13은 캠축 회전속도 300rpm 일 때 분공 출구의 각이 0도에서 90도 까지 변화시킨 경우의 분사압력과 니들양정의 변화를 나타낸다. 캠에 의하여 분사펌프가 작동되는 1ms에서 분사압력이 급격히 증가하여 2ms 후에 정점을 나타낸 직후 압력이 낮아지면서 두 차례 압력변동을 나타내고 다시 증가하여 8ms 근처에서 최대 압력을 나타낸다. 이후 압력의 파동을 지속적으로 보이면서 점차 낮아져 잔류압력 153bar 정도를 유지한다. 니들양정은 초기 분사압력 정점이 발생하는 2ms 근처에서 급격히 증가하여 최대 양정 설계 값 0.45mm 보다 높은 0.7mm를 나타낸 후 0.2mm 정도까지 낮아지는 진동을 발생한 후에 설계치인 0.45mm를 유지한다. 분사 압력이 165bar 근처까지 낮아지면 몇 차례의 진동과 함께 니들이 닫히게 된다. 초기 큰 폭의 진동발생은 실험오차이다. 니들의 양정을 측정하기 위하여 니들 상부시트 (needle upper seat)에 미세봉을 부착하여 갭 센서로 그 거동을 측정하였기 때문에 분사시 발생하는 진동으로 인하여 상부시트의 떨림과 함께 발생한 오차로 판단된다. 분공출구 각이 0도에서 90도까지 모든 경우에 분사압력의 변화는 매우 유사하다. 0도 일 때 미세하게 높은 분사압을 나타내며 30도 일 때 비교적 낮은 값을 나타낸다. 니들 양정의 변화 역시 분사가 시작된 초기에서 중기까지는 모두 유사한 변화를 나타내지만, 니들이 닫히기 시작하는 시점은 분공 출구각의 변화에 따라 미세한 차이를 나타낸다. 0도의 경우가 가장 늦으며 30도 일 때 가장 빠르고 60도 일때는 다른 경우와 다르게 니들 진동을 동반하지 않고 닫히는 거동을 나타낸다. 이는 노즐 분공에서의 유동 저항은 분공 출구 각도가 30도와 60도일 때 줄어든 후에 90도일 때 다시 증가한다는 것을 의미한다.

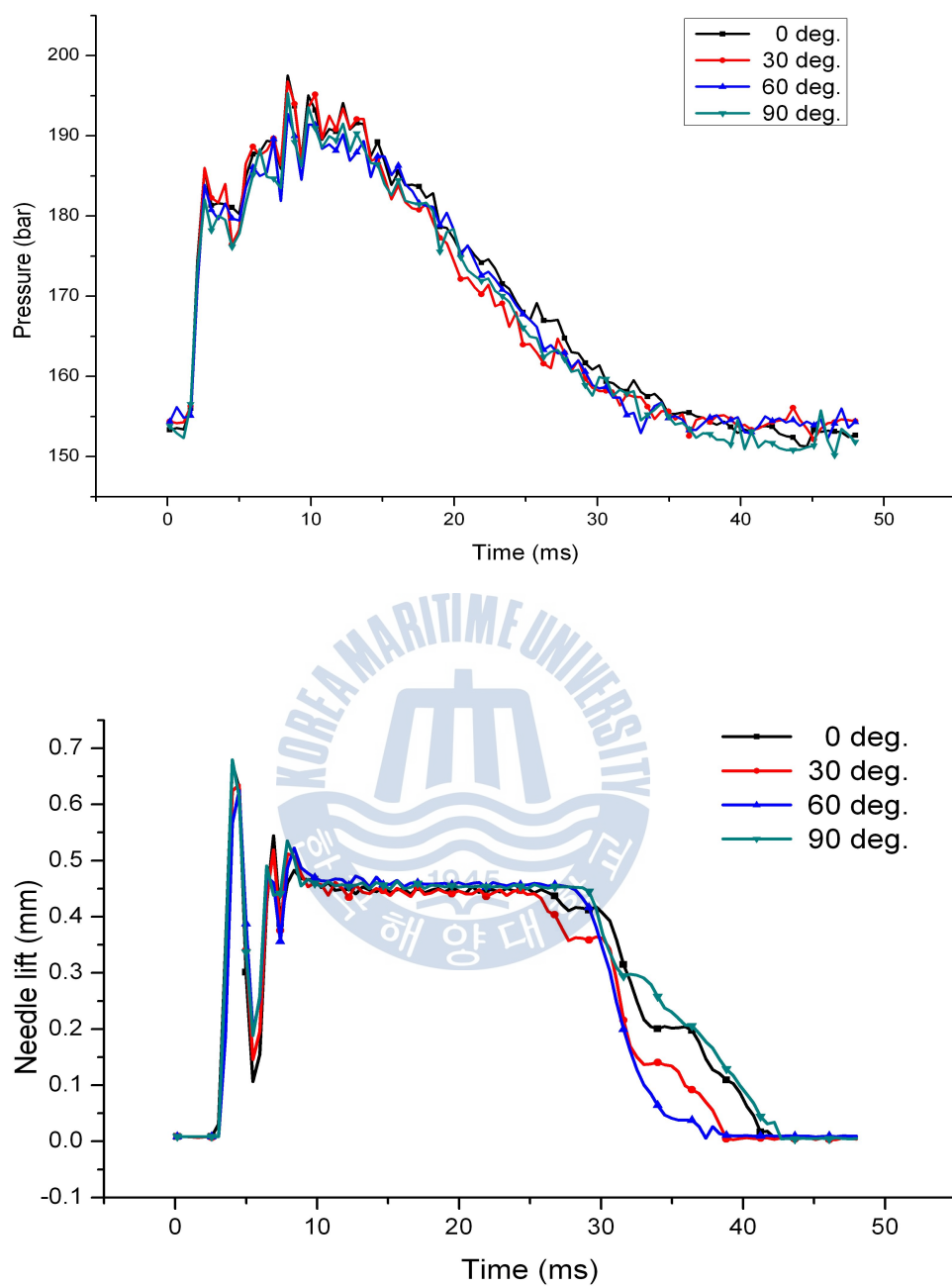


Fig. 2.13 Variations of injection pressure and needle lift at cam shaft speed 300rpm

Fig 2.14는 캠축 회전속도가 400rpm 일 때 분공 출구의 각이 0도에서 90도까지 변화시킨 경우의 분사 압력과 니들 양정의 변화를 나타낸다. 캠에 의하여 분사펌프가 작동되는 2ms에서 분사압력이 급격히 증가하여 3ms에서 정점을 나타낸 직후 다시 압력이 낮아 진후 두 차례 압력변동을 보이고 다시 증가하여 6ms에서 최대 압력을 나타낸다. 이후 압력이 지속적으로 낮아 지다 30ms 근처에서 155bar 정도를 유지하는 경향을 보인다. 니들 양정은 300rpm 경우와 마찬가지로 최대 0.75mm 까지 올라갔다가 다시 0.1mm 정도 까지 낮아진 후 설계치인 0.45mm를 유지한다. 분사 압력이 160bar 근처까지 낮아지면 니들도 닫히게 된다.

분공 출구 각이 0도에서 90도까지 분사압력의 변화는 유사하다. 0도일 때 미세하게 높은 분사 압을 보이며 90도 일 때 비교적 낮은 압력을 보인다. 니들 양정의 변화 역시 분사가 시작된 초기에서 중기까지는 모두 유사한 변화를 나타내지만 니들이 닫히기 시작하는 시점은 분공 출구각의 변화에 따라 미세한 차이를 나타낸다. 90도의 경우가 가장 늦은 시간을 나타내며 60도일 때 가장 빠르고 30도일 때 다시 늦어지며 0도일 때 가장 늦어진 다.



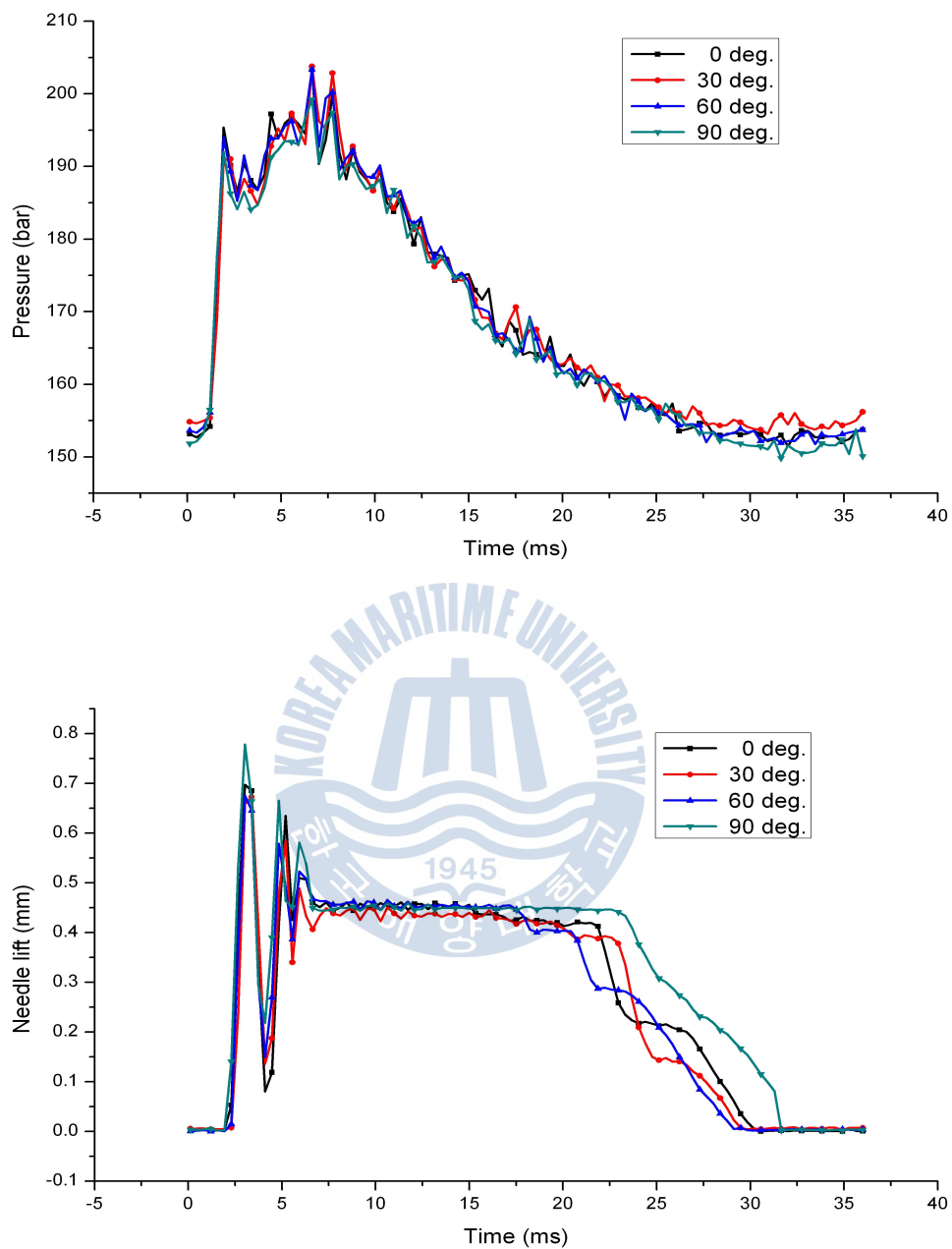


Fig. 2.14 Variations of injection pressure and needle lift at cam shaft speed 400rpm



Fig 2.15는 캠축 회전속도가 500rpm 일 때 분공출구의 각이 0도에서 90도까지 변화시킨 경우의 분사압력과 니들양정의 변화를 나타낸다. 캠에 의하여 분사펌프가 작동되는 1ms에서 분사압력이 급격히 증가하여 2ms후에 정점을 나타낸 후 압력이 낮아지면서 한차례 압력변동을 나타내다가 다시 증가하여 6ms 부근에서 최대 압력을 보인다. 이후 압력이 점차 낮아지다가 155bar의 잔류압력을 유지한다. 니들양정은 초기 분사 압력 정점이 발생하는 2ms에서 급격히 증가하다가 최대 양정 설계 값 0.45mm보다 높은 0.7mm를 나타낸 후 다시 0.05mm로 낮아지는 진동을 발생한 후에 설계치인 0.45mm를 유지한다. 분사압력이 160bar 정도로 낮아지면 몇 번의 진동 발생 후 니들이 닫히게 된다.

분공 출구 각이 0도에서 90도까지 모든 경우에 분사압력의 변화는 앞의 경우와 매우 유사하다. 0도인 경우가 미세하게 높은 분사 압을 나타내고 60도인 경우가 비교적 낮은 값을 나타낸다. 니들 양정의 변화 역시 분사가 시작된 초기에서 중기까지는 모두 유사한 변화를 나타내지만, 니들이 닫히기 시작하는 시점은 분공 출구각의 변화에 따라 미세한 차이를 나타낸다. 90도의 경우가 가장 늦으며 30도 일 때 가장 빠르고 0도 일 때 다시 늦어지며 60도일 때 가장 늦은 시간을 나타낸다. 300rpm의 경우와 비슷하게 60도일 때는 다른 경우와 다르게 니들 진동을 동반하지 않고 닫히는 거동을 나타내는데 이 것 역시 노즐 분공에서의 유동저항은 분공 출구 각도가 30도와 60도일 때 줄어든 후에 90도일 때 다시 증가한다는 것을 의미한다.

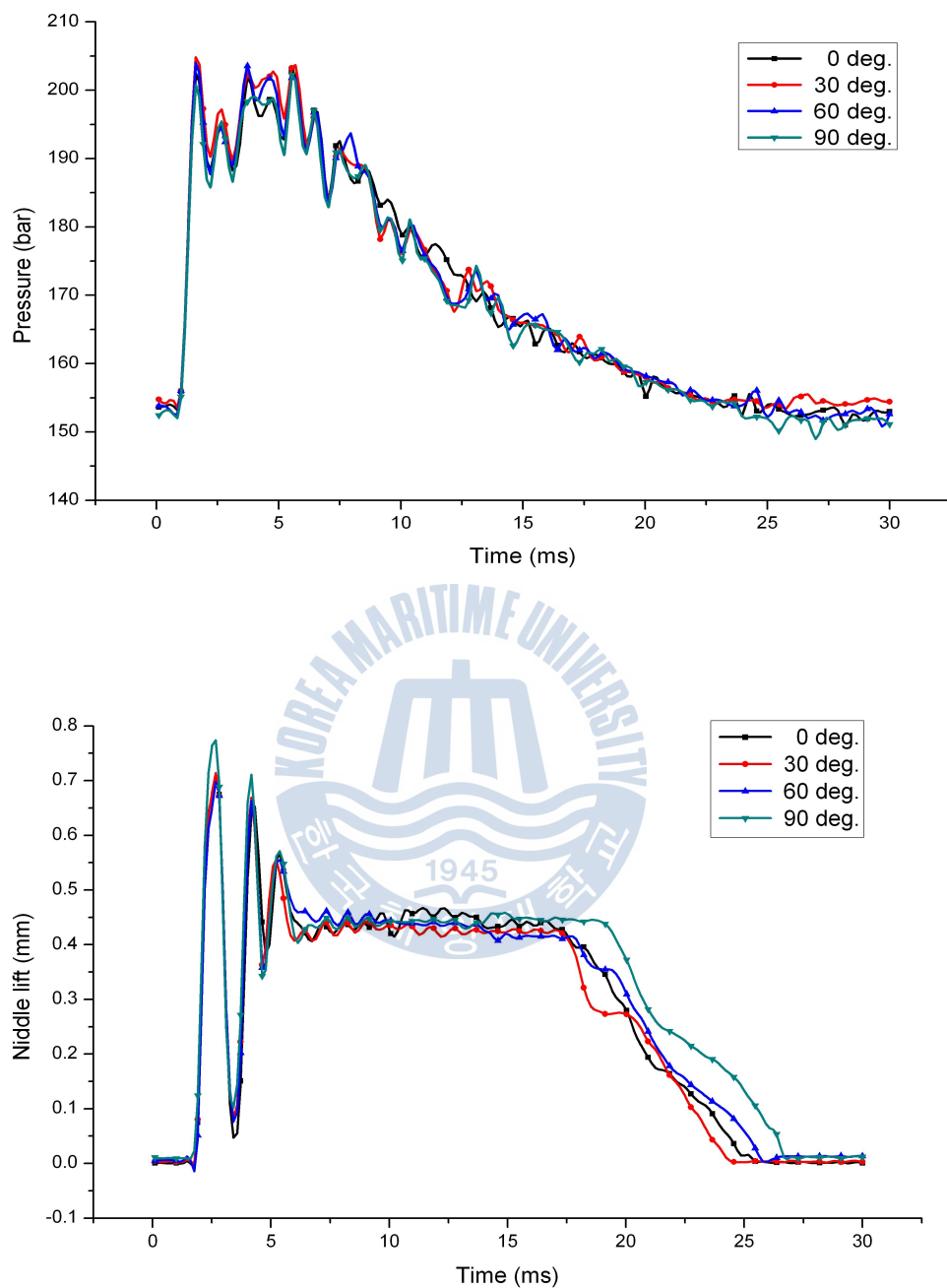


Fig. 2.15 Variations of injection pressure and needle lift at cam shaft speed 500rpm

Fig 2.16은 캠축 회전속도가 300rpm, 400rpm, 500rpm에 따른 노즐 출구 각도의 일회 분사 량을 나타낸다. 전반적으로 4가지 경우 모두 비슷한 경향을 보이지만 0도의 경우와 90도의 경우가 유량 값이 낮은 편이며 30도와 60도의 경우가 유량 값이 높으며 그 중에서도 60도의 경우가 가장 유량 값이 높다. 이것은 60도와 30도의 경우가 다른 경우들에 비하여 출구에서의 유동 저항이 낮으면서 압력도 낮아 유량이 많은 것으로 사료된다.

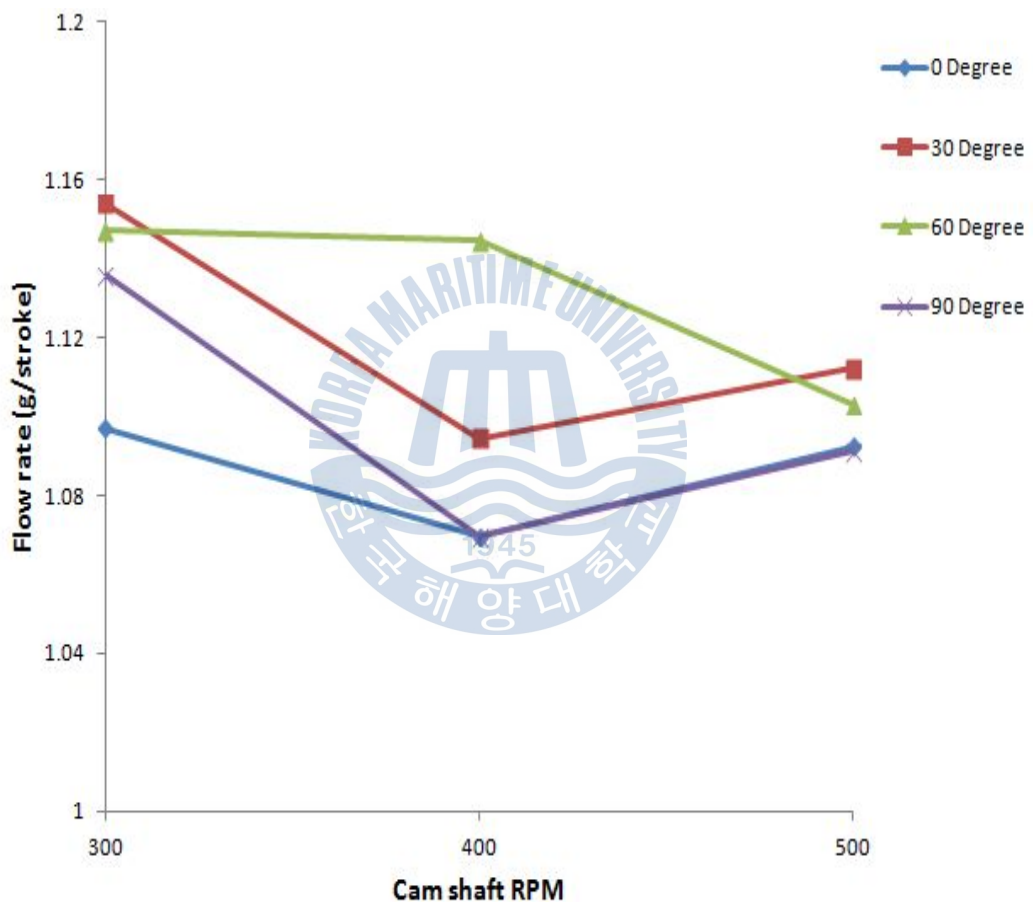


Fig. 2.16 Variation of mass flow rate in each exit angle of nozzle hole at 300, 400, 500rpm

Fig 2.17은 캠축 회전속도 300rpm, 400rpm, 500rpm에 따른 노즐의 출구 각도에 따라 니들이 닫히는 시간을 나타낸다. 4가지 경우 모두 비슷한 경향을 보인다. 노즐 출구 각도가 0도인 경우가 모든 rpm에서 니들이 가장 늦게 닫히며 다음으로 출구 각도가 없는 0도가 늦게 닫힌다. 그리고 30도와 60도의 경우가 전반적으로 빨리 닫힌다. 이것 역시 30도와 60도의 경우가 유동저항의 크기가 작아서 빨리 닫히는 것으로 사료된다.

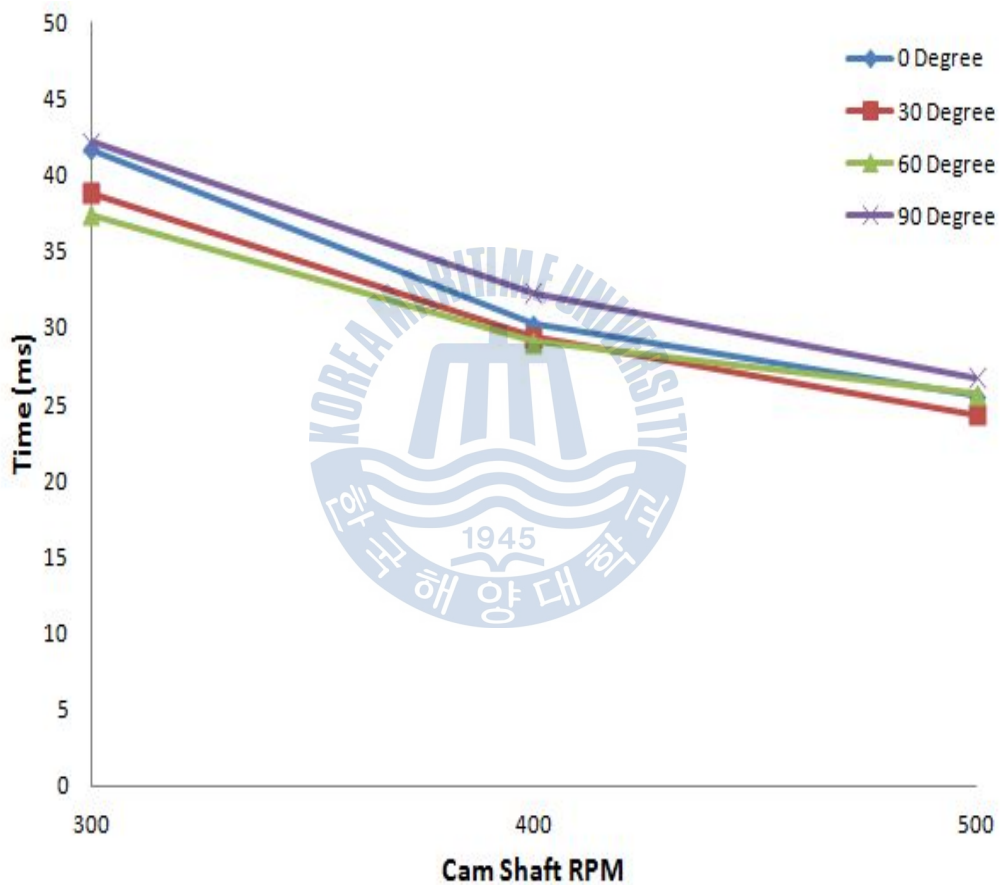


Fig. 2.17 Variation of needle closing time in each exit angle of nozzle hole at 300, 400, 500rpm

### 2.2.2 연속 유량 실험

Fig 2.18은 A사 에서 실험한 연속 유량 데이터 이다. 전체적으로 각도가 증가할수록 유량도 증가하는 경향을 보인다.

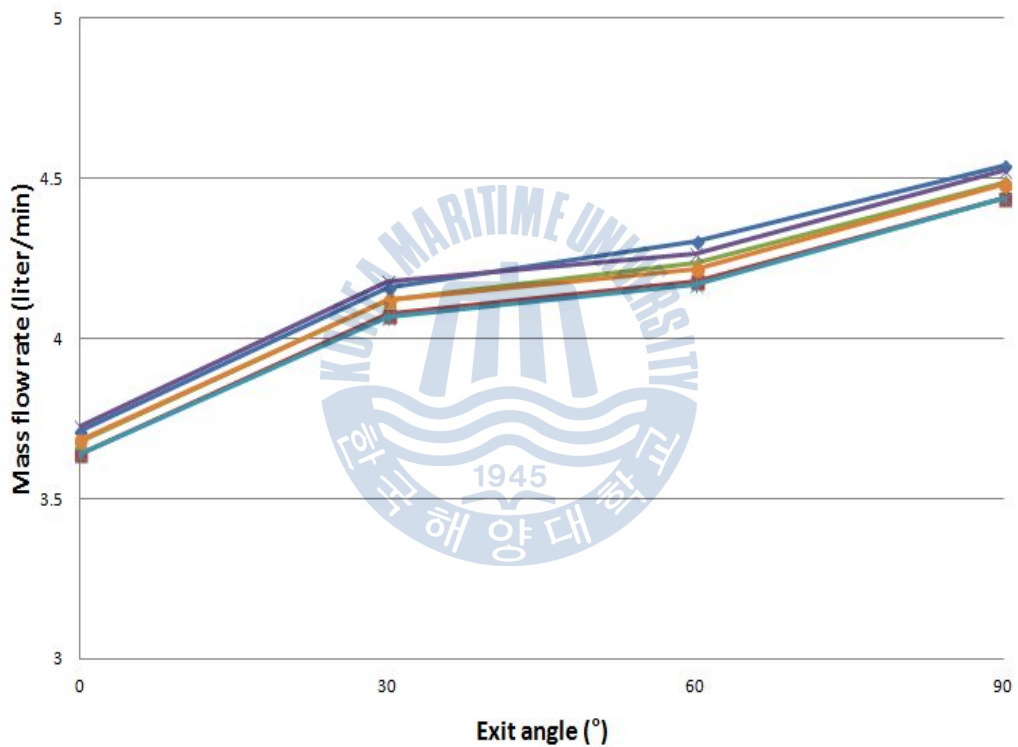
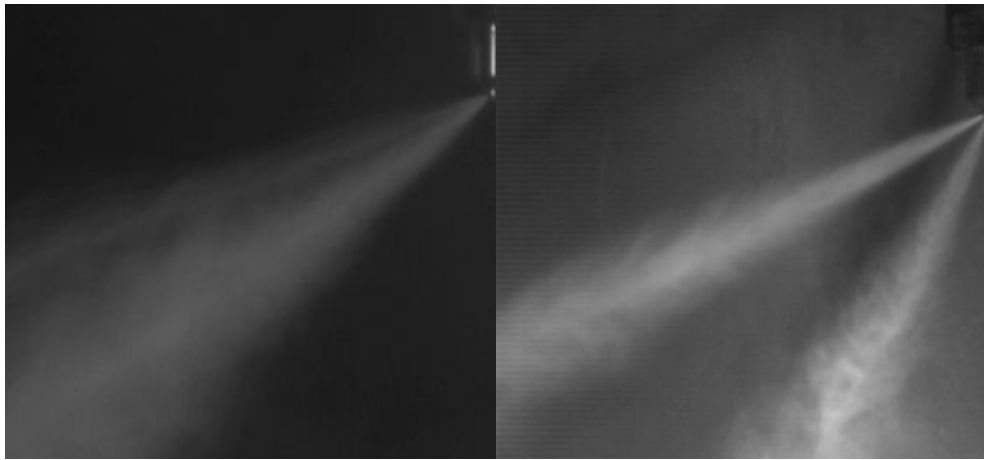


Fig. 2.18 Variation of mass flow rate in each exit angle of nozzle hole

### 2.2.3 분무 특성 실험

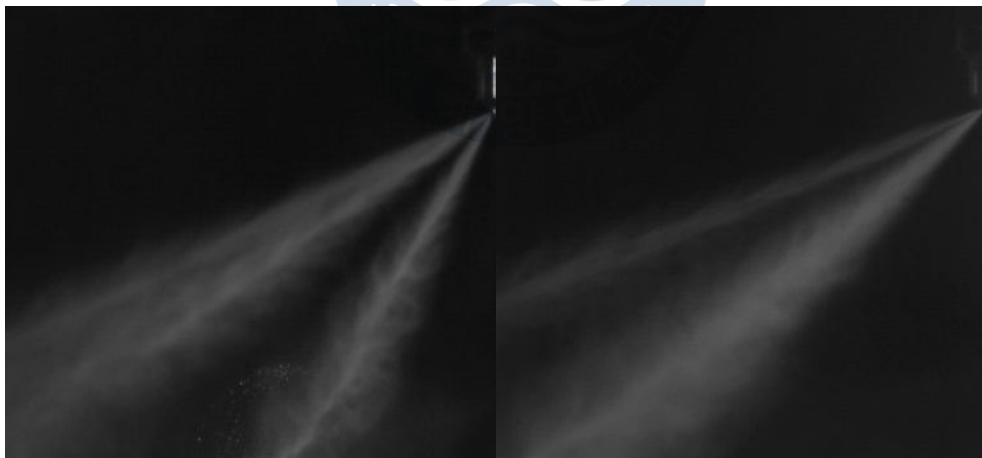
Fig. 2.19는 캠축 회전 속도에 따른 노즐의 분무 특성을 확인하기 위하여 고속 카메라를 이용하여 초당 5,000프레임으로 촬영한 분무 사진이다. 노즐 홀이 6개라 각각의 경우마다 노즐의 홀을 맞추어서 정확한 위치에서 촬영을 하기가 어려워서 약간의 실험 오차가 발생하였다. 분사 각은 노즐 홀에서 연료 분사시의 각도를 의미하며 분무 폭은 연료 분사시에 분사방향으로 400mm 지점에서의 폭을 의미한다. Fig. 2.20의 그래프는 노즐 출구 각도에 따라 연료가 노즐 홀에서 분사되는 각도를 측정한 것이다. 300rpm의 경우 0도에서 30도로 가면서 분사각이 최대로 증가하였다가 60도에서 90도가 되면서 감소하는 경향을 보이며 400rpm의 경우도 마찬가지로 30도에서 최대 분사 각을 보이며 60도 90도로 각도가 커지면서 분사각이 감소한다. 회전 속도가 빠른 500rpm의 경우 0도에서 30도가 되면서 분사 각이 증가하며 60도가 되면서 어느 정도 30도와 비슷한 분사각을 유지하다 90도에서 최저 분사각을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 2.21의 그래프는 노즐 출구 각도에 따라 분사 시에 400mm 지점에서의 분무 폭을 측정한 그래프이다. 분무 폭은 300rpm의 경우 0도가 폭이 가장 좁으며 30도에서 폭이 가장 넓어지다 60도에서 감소하며 90도에서는 0도와 폭이 비슷해진다. 400rpm의 경우는 0도에서 30도에서 폭이 가장 넓으며 60도에서 약간 감소하다 90도에서 폭이 가장 좁으며, 500rpm의 경우는 0도에서 폭이 증가하다 30도 60도로 가면서 최대 폭을 보이며 다시 90도가 되면서 0도와 폭이 비슷해진다. 이상의 분무 특성 분석 결과 30도와 60도의 경우가 다른 경우들에 비해 분무 각이 크며 분사 시에 주변에 와류가 다른 경우에 비해 많이 발생

하여 유동이 넓게 확산 되어 커진 것으로 사료된다.



a) Exit angle  $0^{\circ}$

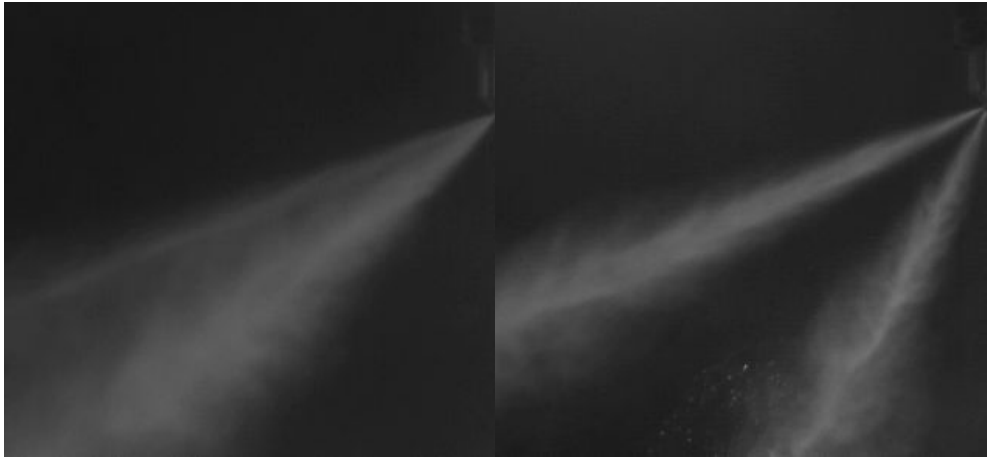
b) Exit angle  $30^{\circ}$



c) Exit angle  $60^{\circ}$

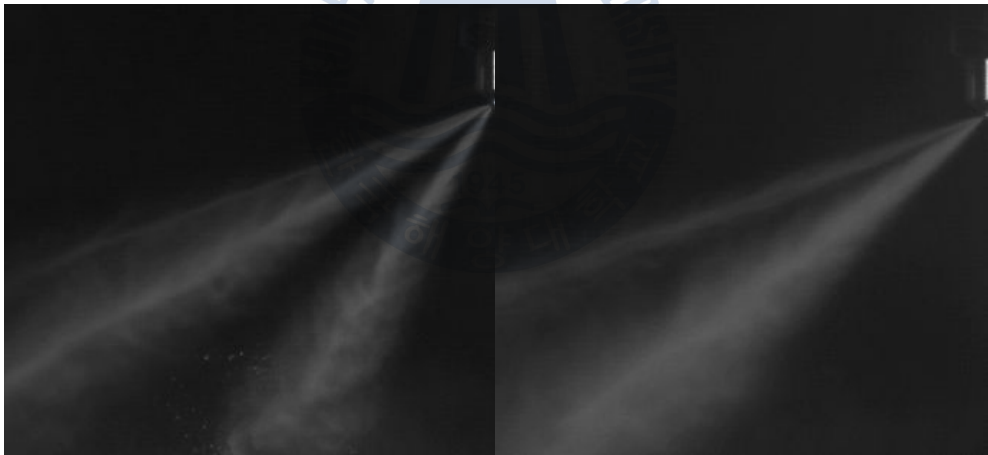
d) Exit angle  $90^{\circ}$

Fig. 2.19-1 Spray Photo. at 300rpm



a) Exit angle  $0^{\circ}$

b) Exit angle  $30^{\circ}$

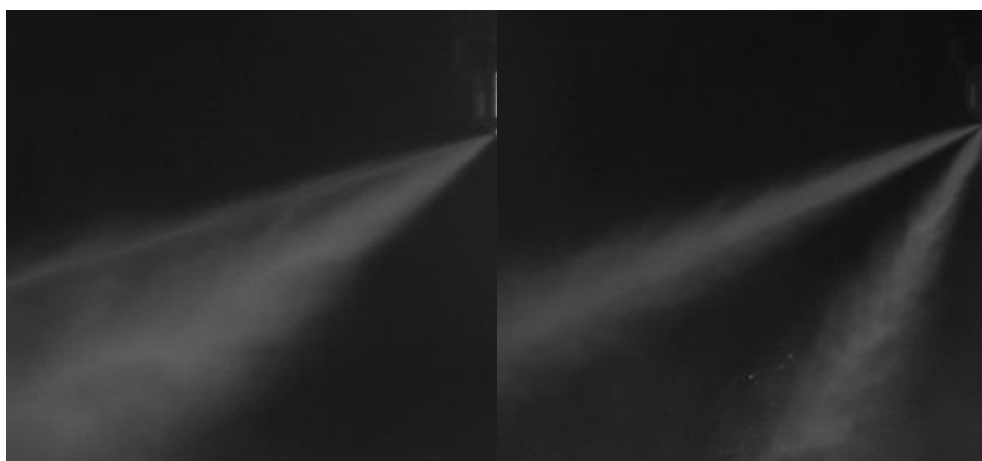


c) Exit angle  $60^{\circ}$

d) Exit angle  $90^{\circ}$

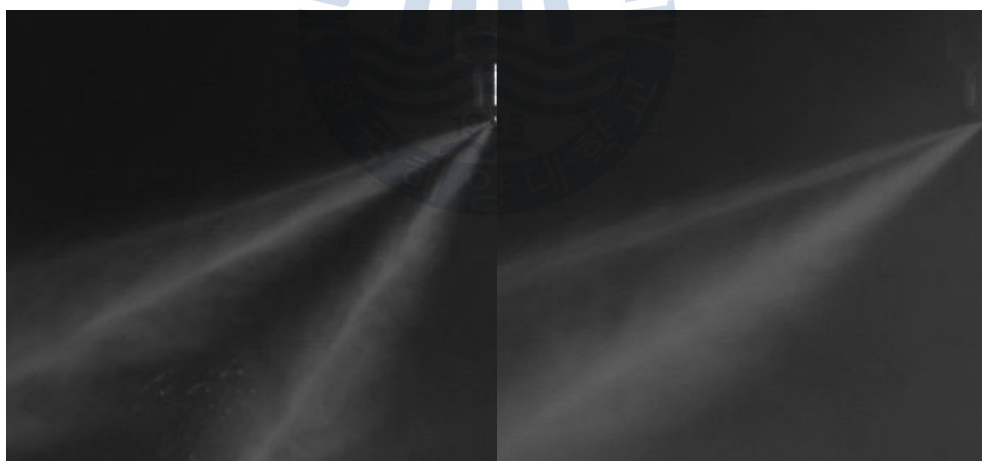
Fig. 2.19-2 Spray Photo. at 400rpm





a) Exit angle  $0^{\circ}$

b) Exit angle  $30^{\circ}$



c) Exit angle  $60^{\circ}$

d) Exit angle  $90^{\circ}$

Fig. 2.19-3 Spray Photo. at 500rpm

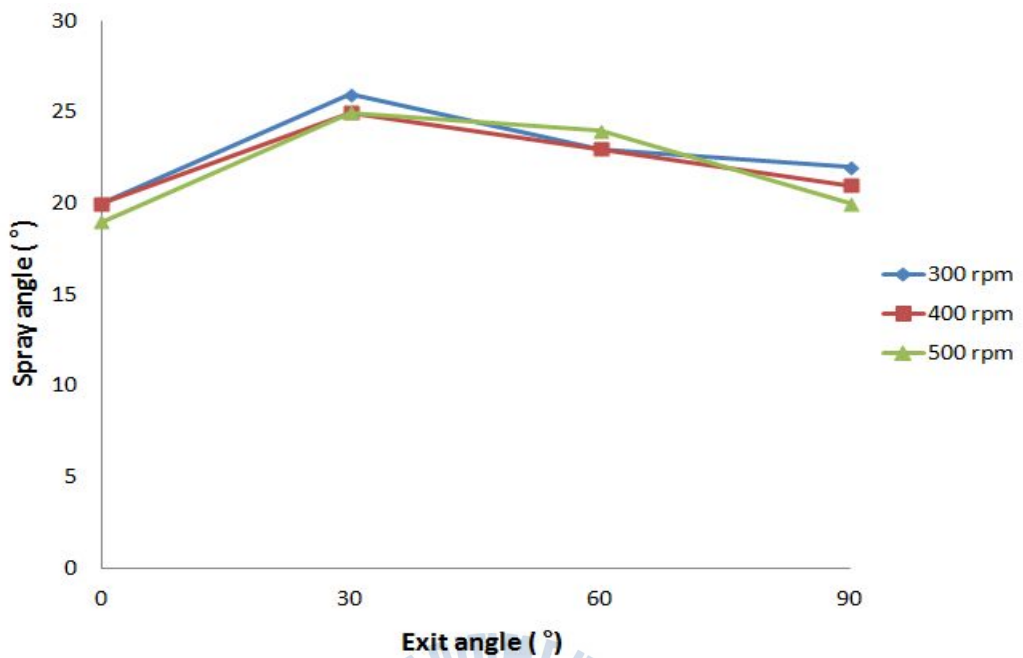


Fig. 2.20 Spray angles with exit angle variation

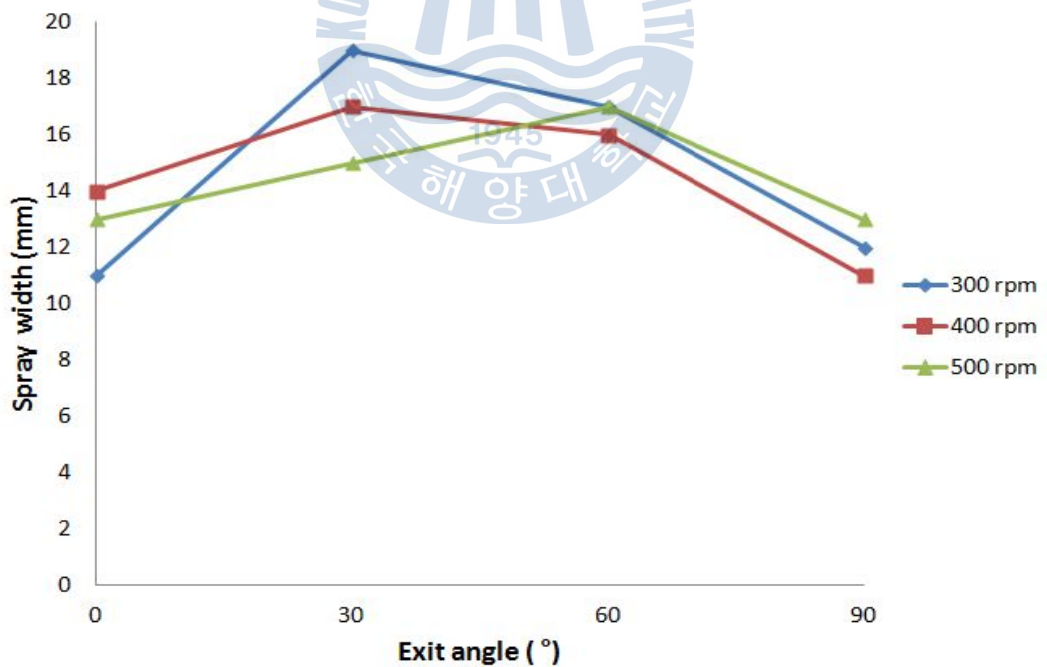


Fig. 2.21 Spray widths with exit angle variation

## 2.3 실험결과 요약

압력의 경우 300rpm에서 분사압력의 변화는 출구 각도에 관계없이 모두 유사한 경향을 나타낸다. 0도 일 때 미세하게 높은 분사압을 나타내며 30도인 경우가 비교적 낮은 분사압을 보인다. 400rpm의 경우 분사압력의 변화는 0도 일 때 미세하게 높은 분사압을 나타내며 90도인 경우가 비교적 낮은 분사압을 보이며 500rpm의 경우 분사압력의 변화는 0도 일 때 미세하게 높은 분사압을 나타내며 60도인 경우가 비교적 낮은 분사압을 보인다. 니들 양정의 거동은 세 가지 회전 속도에서 모두 0도의 경우가 가장 늦게 닫히며 30도와 60도의 경우가 빨리 닫힌다. 유량 역시 30도와 60도의 경우가 가장 많다. 분무 특성도 rpm 마다 비슷한 경향을 보이는데 분무각이 30도와 60도가 큰 편이고 분무의 폭 또한 30도와 60도가 크다.

이상의 압력, 니들의 양정, 유량, 분무 특성을 분석하고 종합한 결과 노즐의 출구 각도가 30도와 60도의 두 가지 경우의 사이일 때가 분사 기간이 짧고, 유량도 크며, 분사각과 분무의 폭이 크기 때문에 가장 효과적일 것이라고 사료된다.

## 제 3 장 분사특성에 대한 계산적 고찰

### 3.1 수학적 모델 및 계산 조건

시뮬레이션의 경우 노즐 출구 각도 뿐만 아니라 가공의 어려움으로 실험을 할 수 없었던 노즐 입구 벽면에 곡률 반경을 주는 경우도 같이 해석을 하였다. 분사 노즐 내부의 유동을 해석하기 위하여 A사에서 받아온 2D 도면을 이용하여 3D 모델링 프로그램인 UGS NX로 3D로 변환한 후 ICEM CFD로 격자를 생성한 후 ANSYS CFX로 해석을 수행하였다. 계산시간은 수렴성을 위해 총 타임스텝 3,000번으로 하였으며 경계조건은 Table 2와 Fig. 3.22와 같이 입구 부분에서 기관이 작동시 노즐에 가해지는 압력인 350bar를 주었으며 이때 사용되는 유체는 세탄( $C_{16}H_{34}$ )을 사용하였고 유체의 온도는 40℃로 하였다.

Table 3 Boundary conditions

INLET	Fuel	$C_{16}H_{34}$
	State	Liquid
	Pressure	350 bar
	Temp.	40℃
	Density	0.76 g/cm <sup>3</sup> at 40℃
	Viscosity	2.93 cSt at 40℃
OUTLET	Pressure	1 bar

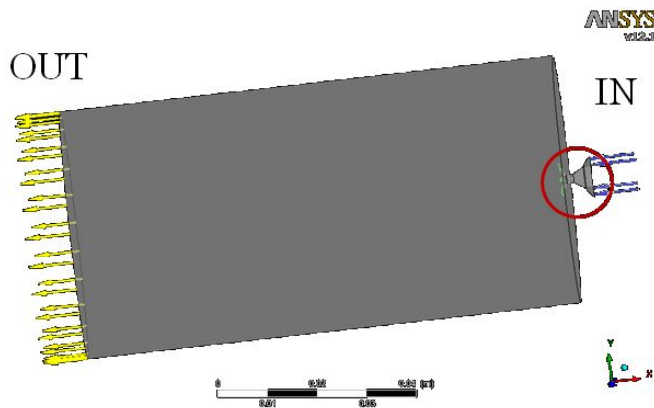


Fig. 3.22 Boundary condition

Table 4 List of symbols

Symbol	Description	Symbol	Description	Symbol	Description
$p$	Pressure	$\rho$	Density	$U$	Vector of velocity
$\tau$	Shear stress	$S_M$	Momentum source	$S_E$	Energy source
$T$	Temperature	$\delta$	Identity matrix	$\mu$	Dynamic viscosity
$h$	Specific enthalpy	$h_{tot}$	Specific total enthalpy	$t$	Time
$k$	Kinetic energy	$w$	Turbulent frequency	$\nu$	Kinematic viscosity

유동 계산에 적용된 질량, 모멘텀, 에너지 보존에 대한 전달 방정식은 다음과 같다.

연속방정식은

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3-1)$$

모멘텀 방정식은

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (3-2)$$

여기서 응력텐서  $\tau$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U) \quad (3-3)$$

에너지 방정식은

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (3-4)$$

여기서  $h_{tot}$ 는 전 엔탈피를 나타내며  $h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2$ 이다.  $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ 는 점성 일의 항이며  $U \cdot S_M$ 은 외부 모멘텀 생성항이다.

난류계산은 계산영역이 작고 형상이 복잡한 경우에 유동특성을 파악하기 위한 계산에 정확도가 높은 SST (Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다.

방정식은 다음과 같다.

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (3-5)$$

$$\arg_1 = \min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500v}{y^2 w}\right), \frac{4\rho k}{CD_{kw} \sigma_w y^2}\right) \quad (3-6)$$

여기서  $y$ 는 벽과의 거리를 나타내며,  $v$ 는 동점성 계수를 나타낸다.

$$CD_{kw} = \max\left(2\rho \frac{1}{\sigma_w w} \nabla k \nabla w, 1.0 \times 10^{-10}\right) \quad (3-7)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (3-8)$$

$$\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500v}{y^2 w}\right) \quad (3-9)$$

이다.

### 3.2 니들이 없는 경우 노즐 출구 각도에 따른 계산 결과 및 고찰

Fig. 3.23은 니들이 없는 경우 노즐 출구 각도에 따른 모델링 형상과 격자를 생성시킨 형상이다. A사에서 니들이 없이 실험을 하여 본 계산에서도 니들이 없이 모델링을 하였다. 격자의 개수는 250만개 이며 입구 압력은 100bar로 A사의 실험과 동일한 압력으로 하였다.

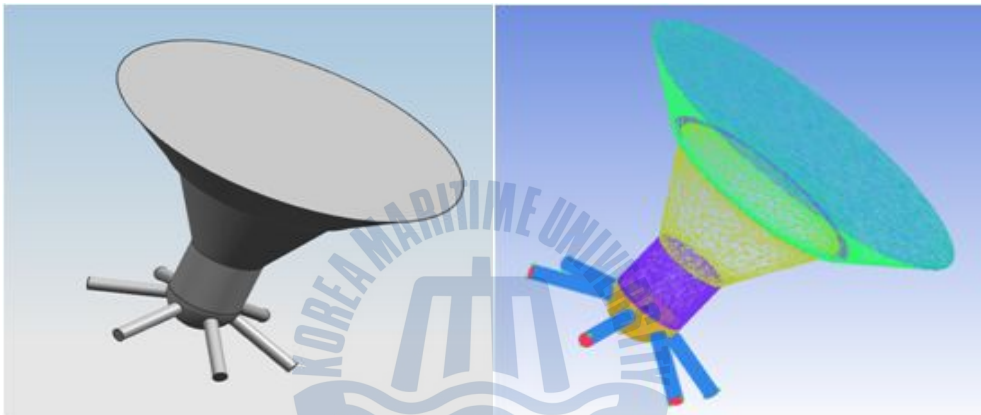
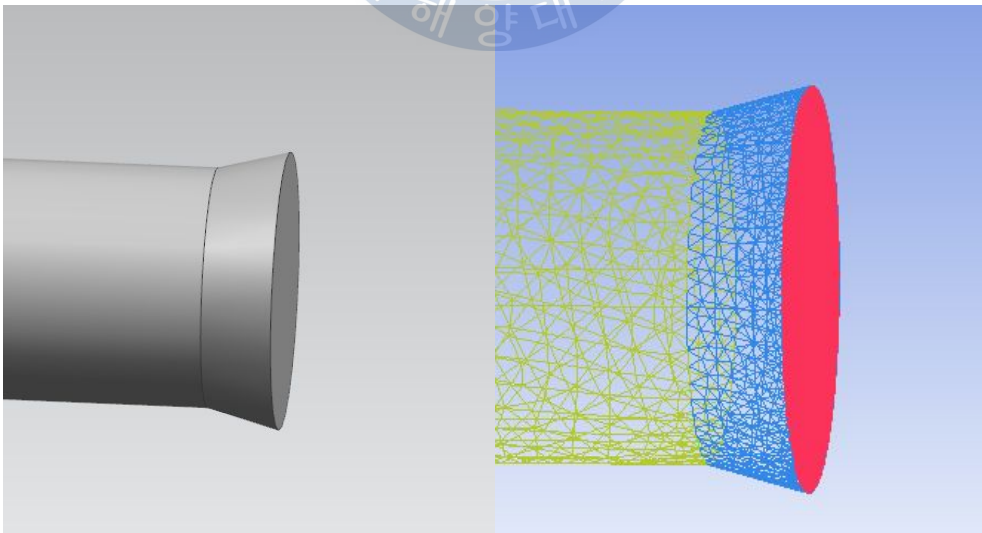
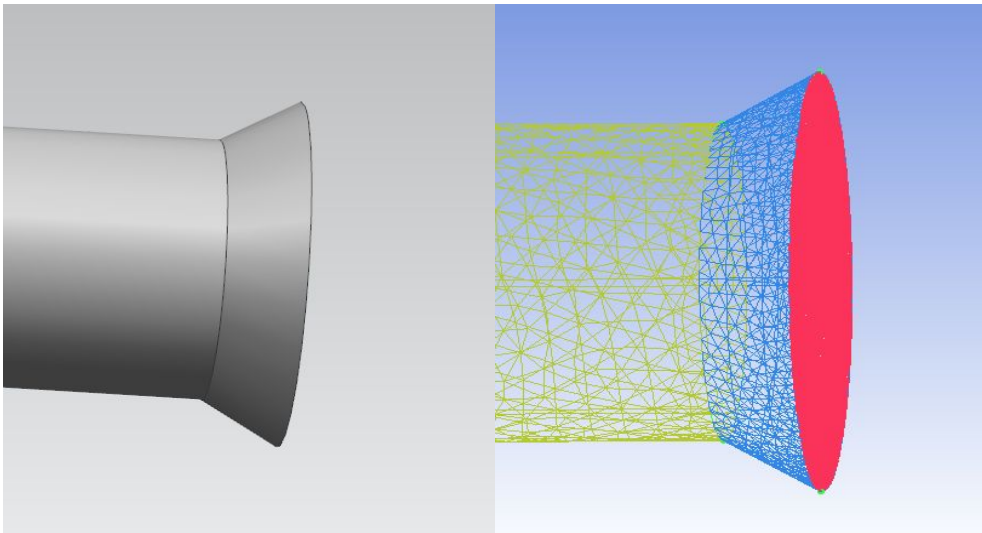


Fig. 3.23 (a) 0 degree

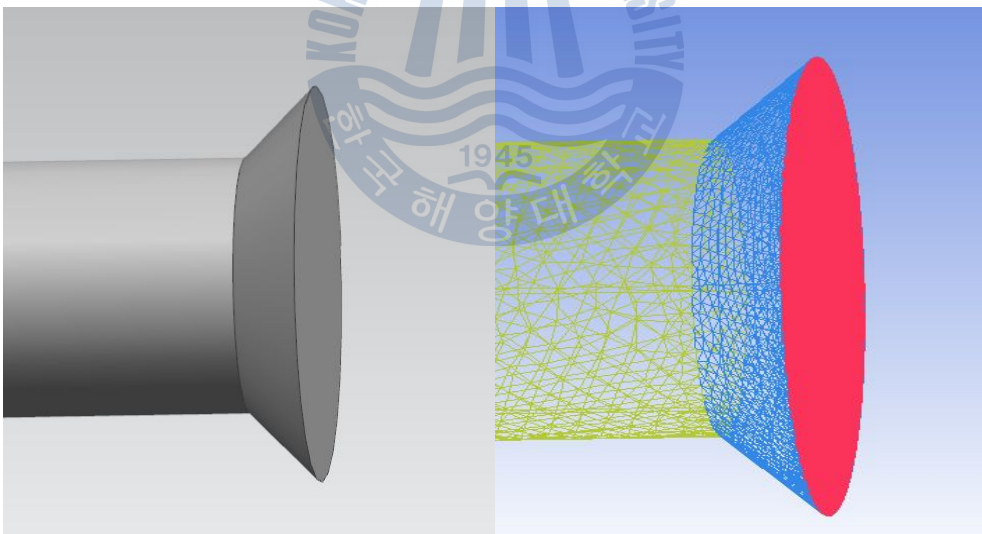


(b) 30 degree





(c) 60 degree



(d) 90 degree

Fig. 3.23 Hole exit geometry and calculation grids

### 3.2.1 유속 및 유량의 변화

Fig. 3.24는 노즐 출구 각도에 따라 노즐 홀 단면에서의 유속과 유량의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 3.25는 홀 단면의 평균 유속을 그래프로 나타낸 것이다. 출구에서는 노즐 각도가 없는 기본 노즐의 경우가 가장 유속이 빠르며 각도가 30도, 60도, 90도로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 이것은 노즐 출구 각도가 커짐에 따라 출구 면적이 커지게 되므로 유속이 점차 줄어드는 것으로 사료된다. Fig. 3.26은 출구에서 연료의 질량유량을 그래프로 나타낸 것이다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과값과 신원 미크론의 유량계측기로 실험한 값을 서로 비교 하였다. 일단 출구 각도가 없는 기본 노즐의 경우 실험과 해석의 유량값이 거의 동일 하게 나왔기 때문에 해석값의 신뢰도를 확보하였다. 노즐 출구 각도가 30도가 되면서 해석값은 최대 유량을 보이며 다시 60도 90도로 출구 각도가 커짐에 따라 감소하는 경향을 보였고 실험값의 경우 30도에서 60도, 90도로 노즐 각도가 증가하면서 유량값이 커진다. 이것은 노즐 홀의 직경이 매우 작으며 정확하게 30도 60도 90도로 정확한 위치에서 가공하기가 어려워 점점 노즐 홀의 직경이 해석값의 직경보다 커지게 되어 유량이 증가한 것으로 사료된다.

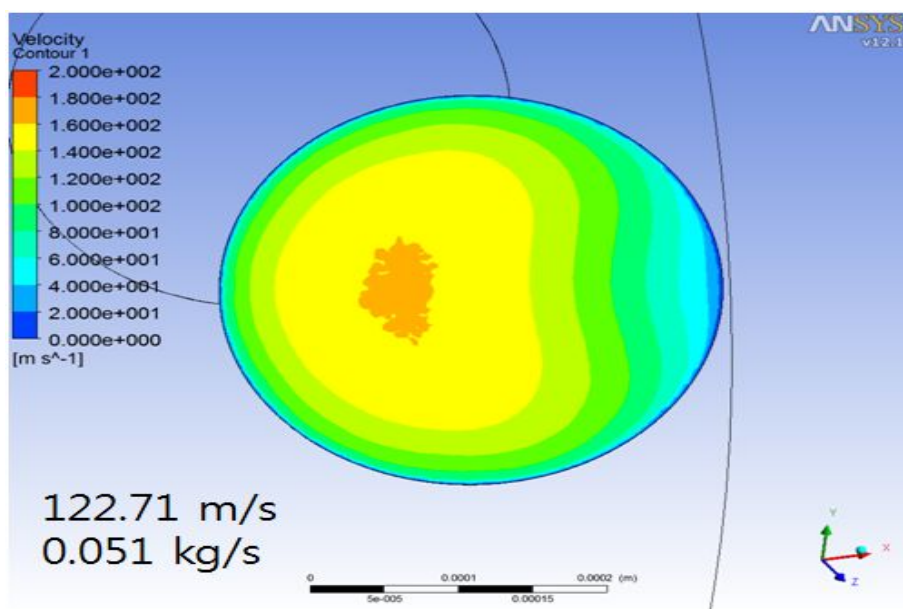
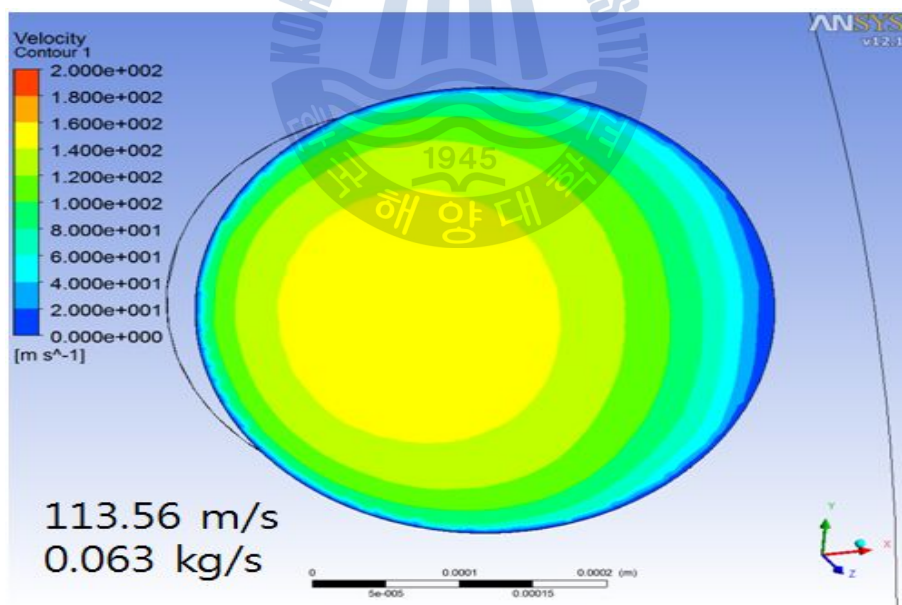
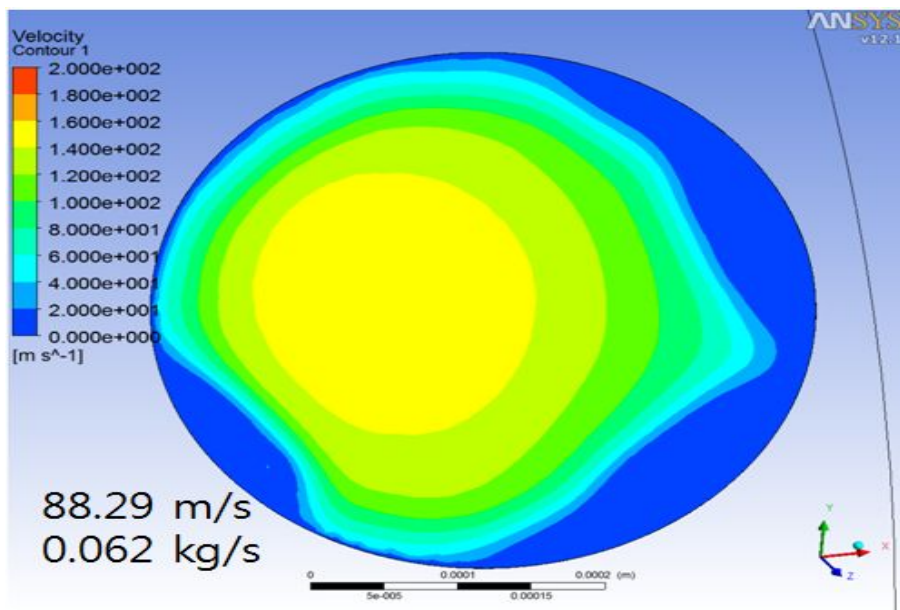


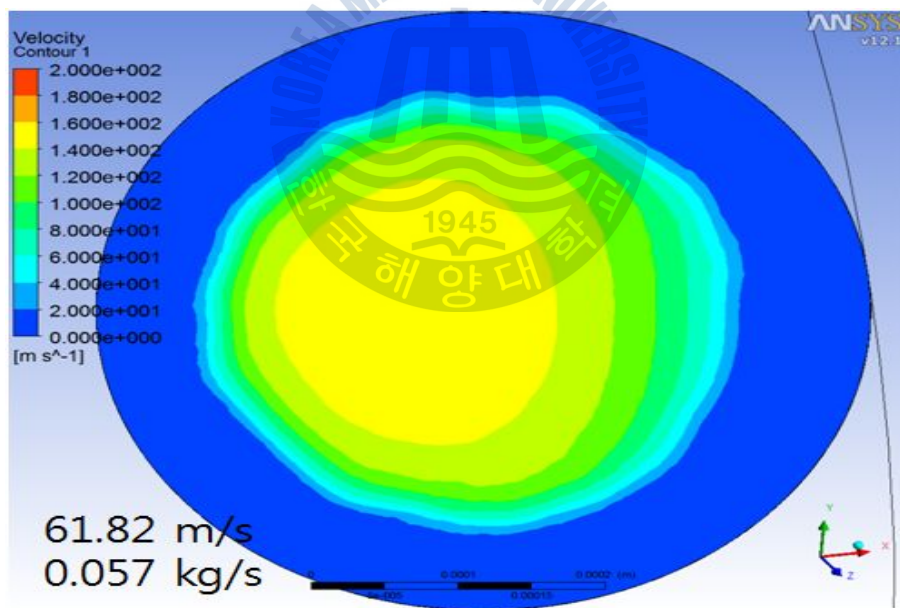
Fig. 3.24 (a) 0 degree nozzle



(b) 30 degree nozzle



(c) 60 degree nozzle



(d) 90 degree nozzle

Fig. 3.24 Variations of outlet flow velocity and mass flow rate in each exit angle of nozzle hole

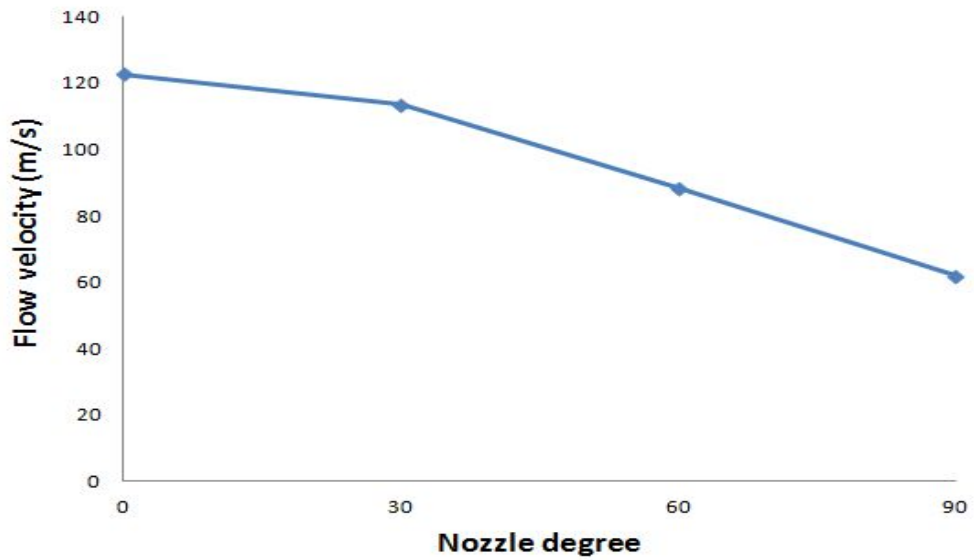


Fig. 3.25 Outlet flow velocity graph in nozzle hole exit angle of

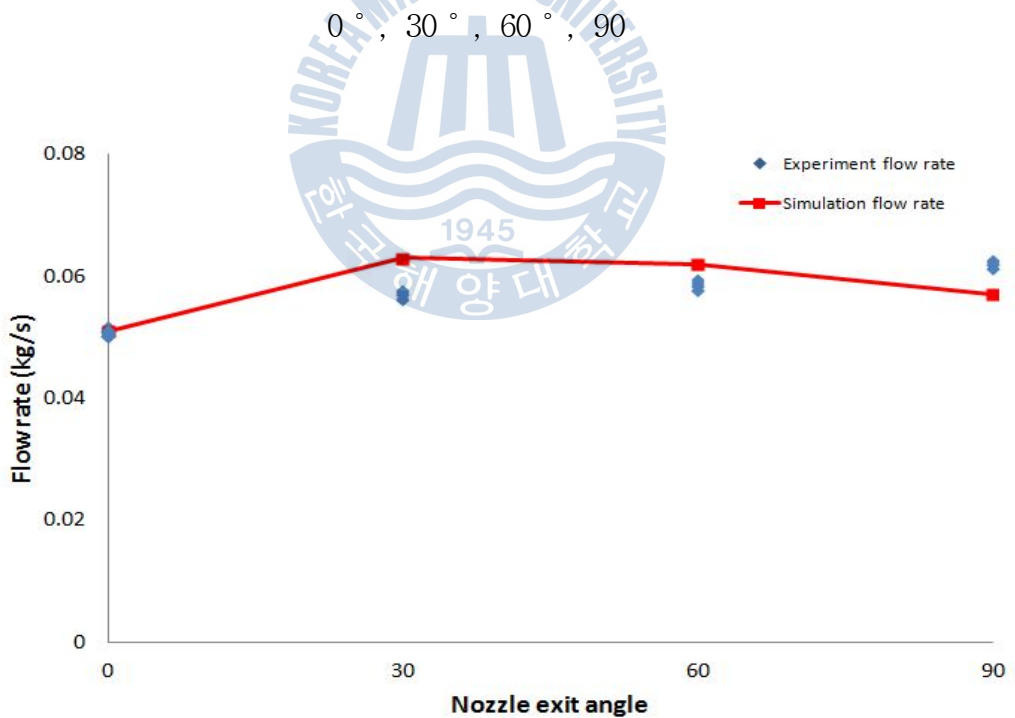


Fig. 3.26 Graph of outlet mass flow rate in each exit angle of nozzle hole

### 3.2.2 압력의 변화

Fig. 3.27은 노즐 출구 각도에 따른 전체 압력 분포의 변화를 ANSYS의 POST를 이용하여 나타낸 것이다. 그림에 유체가 지나는 노즐의 입구에서 출까지의 통로를 표시 하였으며 이때 통로 부분의 압력을 표시 하였다. Fig. 3.28은 위의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 보게 되면 압력이 0도 일 때 보다 30도 일 때 압력이 감소하다가 60도일 때 다시 증가하다 90도 일 때 압력이 가장 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

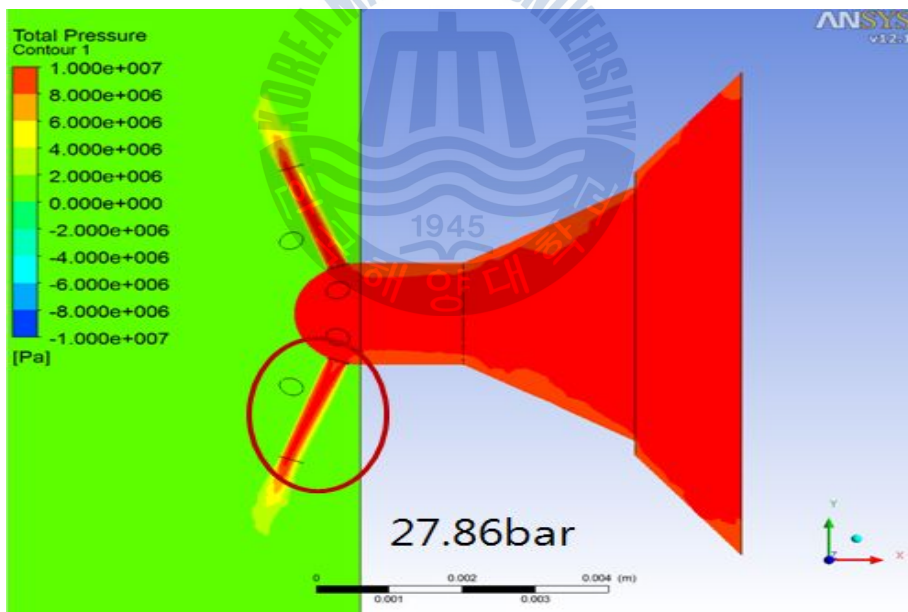
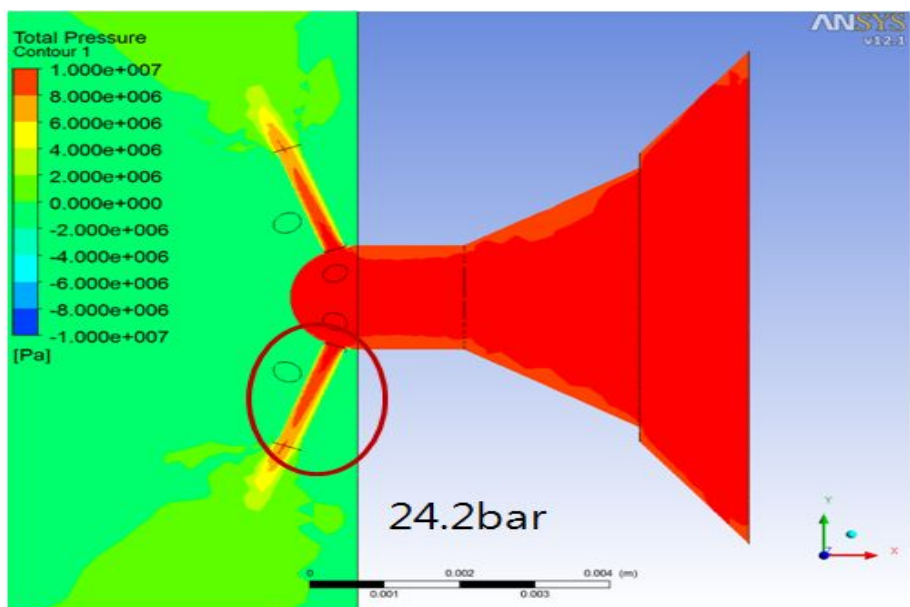
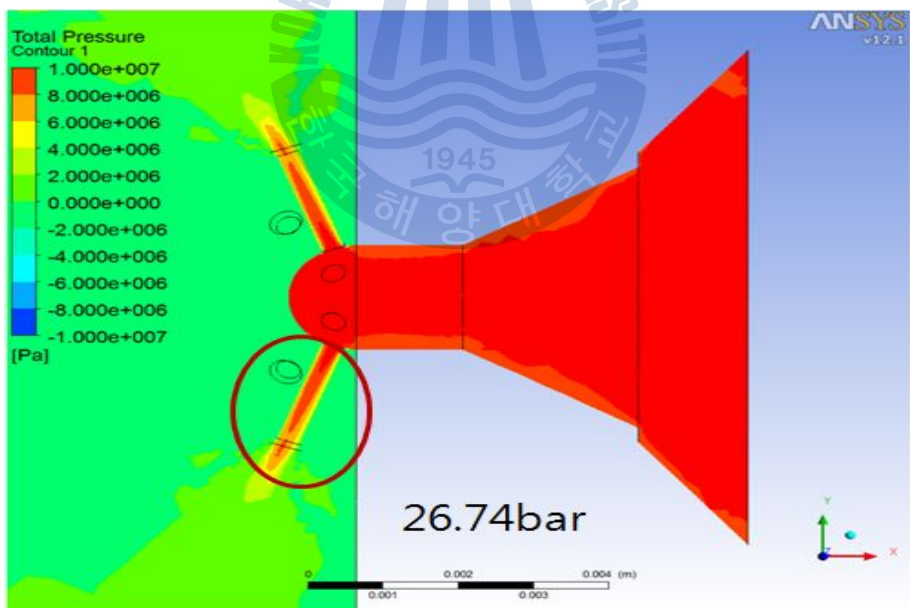


Fig. 3.27 (a) 0 degree nozzle



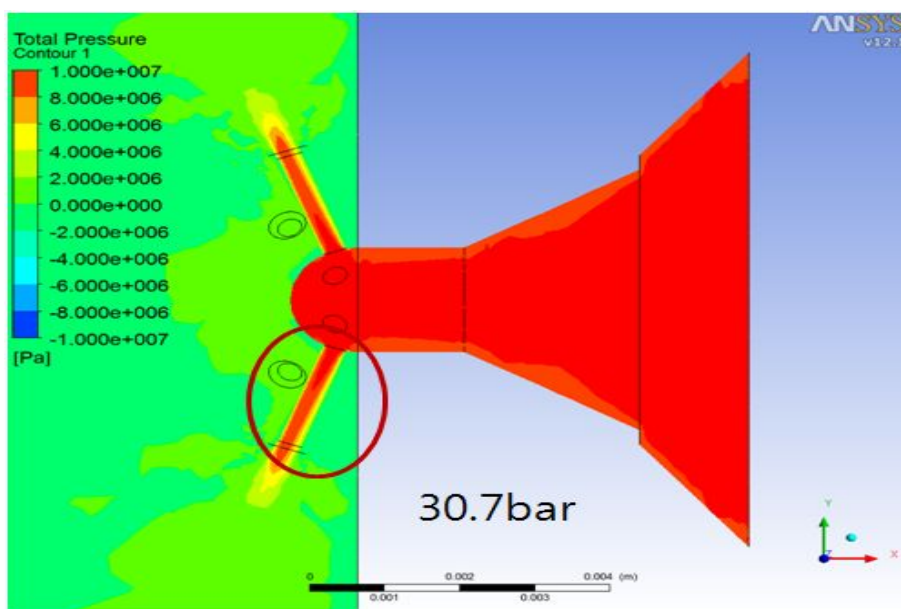


(b) 30 degree nozzle



(c) 60 degree nozzle





(d) 90 degree nozzle

Fig. 3.27 Variation of passage pressure in each exit angle of nozzle hole

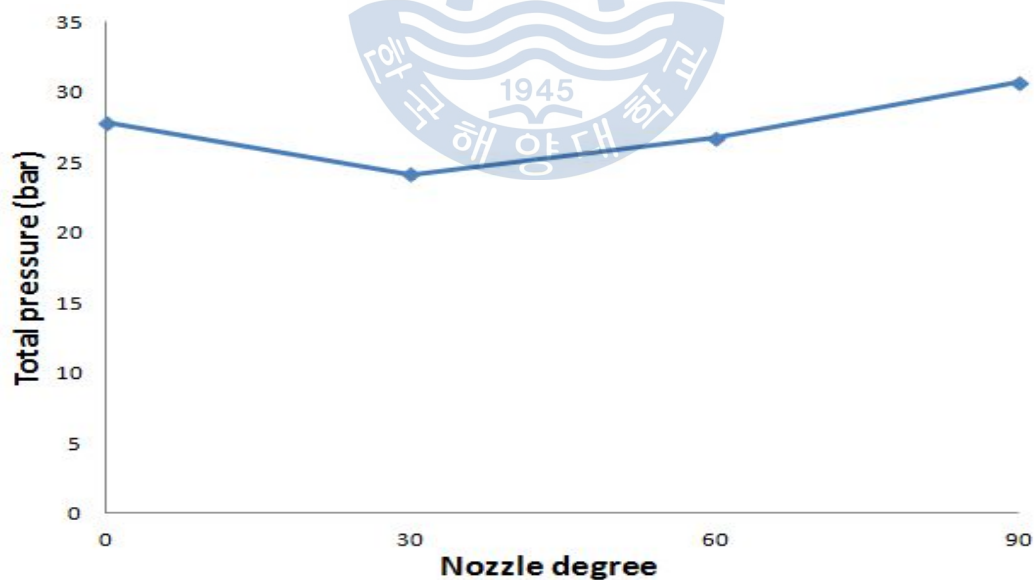


Fig. 3.28 Graph of passage pressure in each exit angle of nozzle hole

Fig. 3.29는 각도 변화에 따른 노즐 홀 단면 부분의 전체 압력 분포를 나타낸 것이고 Fig. 3.30은 압력분포 결과를 좀 더 알아보기 쉽게 그래프로 나타내었다. 이 그래프를 보게 되면 출구 각도가 0도인 경우가 가장 압력이 높으며 각도가 30도 60도 90도로 커짐에 따라 압력이 선형적으로 감소하는 경향을 볼 수 있다.

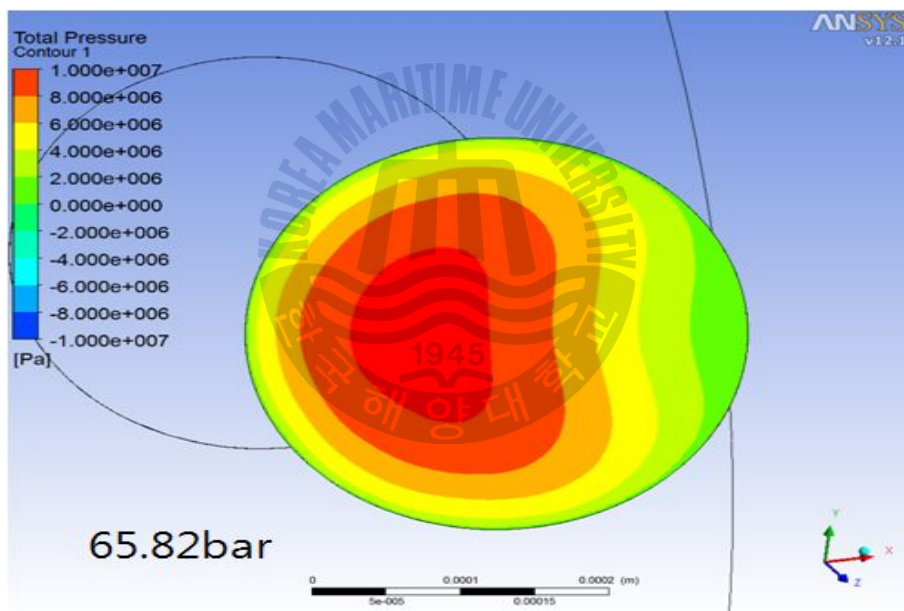
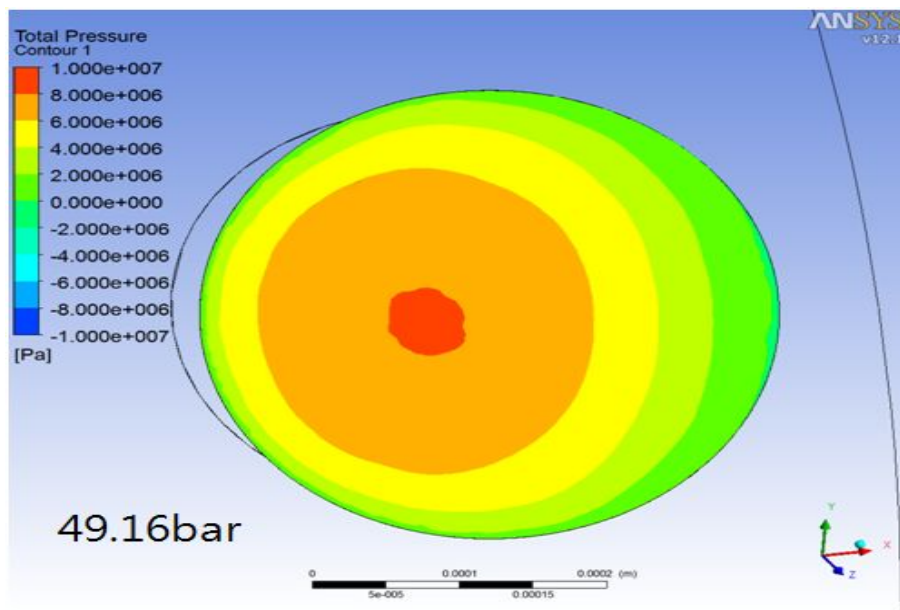
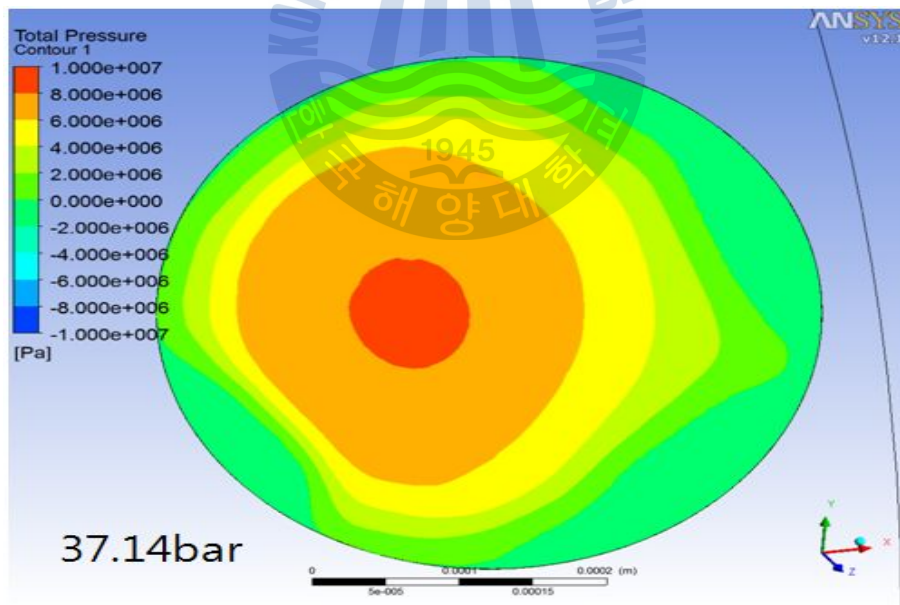


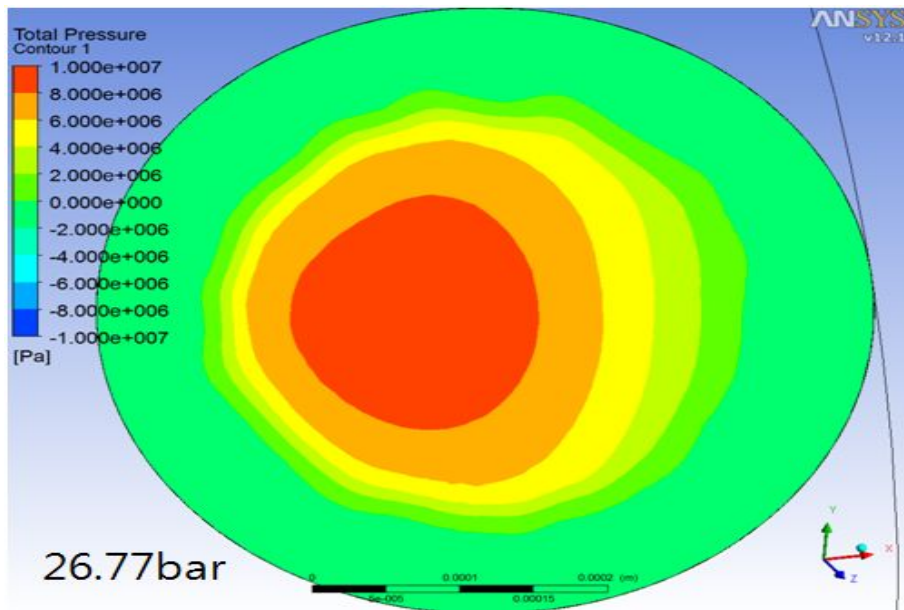
Fig. 3.29 (a) 0 degree nozzle



(b) 30 degree nozzle



(c) 60 degree nozzle



(d) 90 degree nozzle

Fig. 3.29 Variation of outlet pressure in each exit angle of nozzle hole

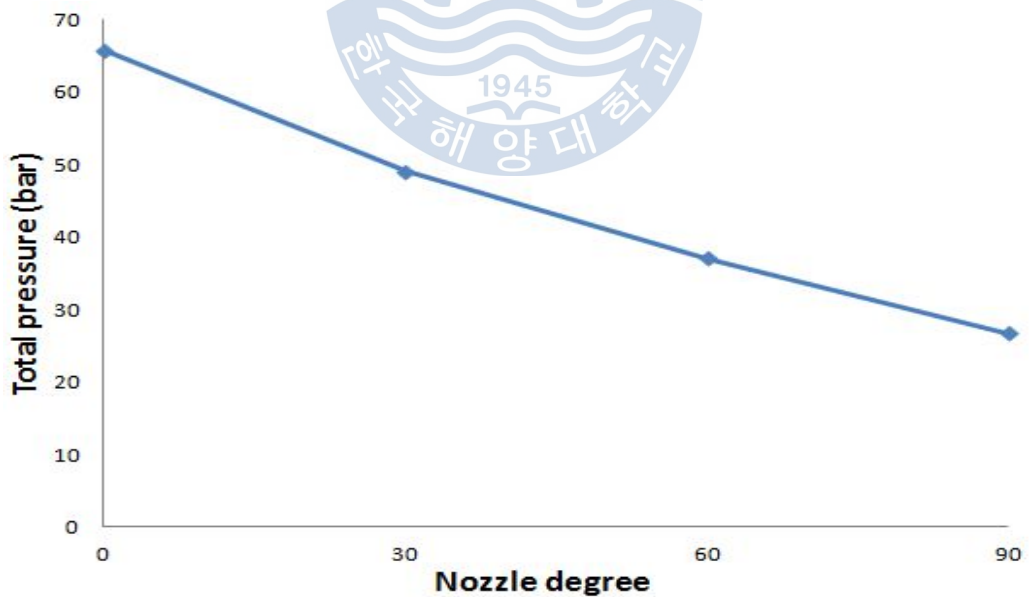


Fig. 3.30 Graph of outlet pressure in each exit angle of nozzle hole

### 3.2.3 계산 결과 요약

노즐 각도에 따른 시뮬레이션 해석결과 유속의 경우 각도가 없는 경우가 가장 빠르며 각도가 30도, 60도, 90도로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 질량 유량의 경우 시뮬레이션 값과 A사의 실험값을 서로 비교 하였다. 각도가 없는 경우 두 가지 모두 유량값이 동일하게 나왔기 때문에 해석값의 신뢰도를 확보하였다. 시뮬레이션의 경우 각도가 30도일 때 최대 유량이 약간씩 증가하는 경향을 보였다. 이것은 노즐 출구의 홀에 각도를 주게 되면서 정확한 위치에 가공하기 어려워 점점 노즐 홀의 직경이 해석값의 직경보다 커지게 되어 유량이 증가한 것으로 사료된다. 압력의 경우 노즐의 유체가 흐르는 통로부분은 0도에서 30도로 가면서 감소하다 다시 60도 90도로 가면서 증가하며 출구 부분은 각도가 커짐에 따라 점차 압력이 감소하는 경향을 보인다. 이상의 분석 결과 노즐 출구 각도가 30도와 60도인 경우가 분사 시에 유동저항이 작아 0도에 비해 압력이 낮고 높은 유량을 가지는 것으로 사료된다.

### 3.3 니들이 있는 경우 노즐 출구 각도에 따른 계산 결과 및 고찰

Fig. 3.31은 노즐 출구 각도에 따른 모델링 형상과 격자를 생성시킨 형상이다. 격자의 개수는 평균 180만개 정도 이다.

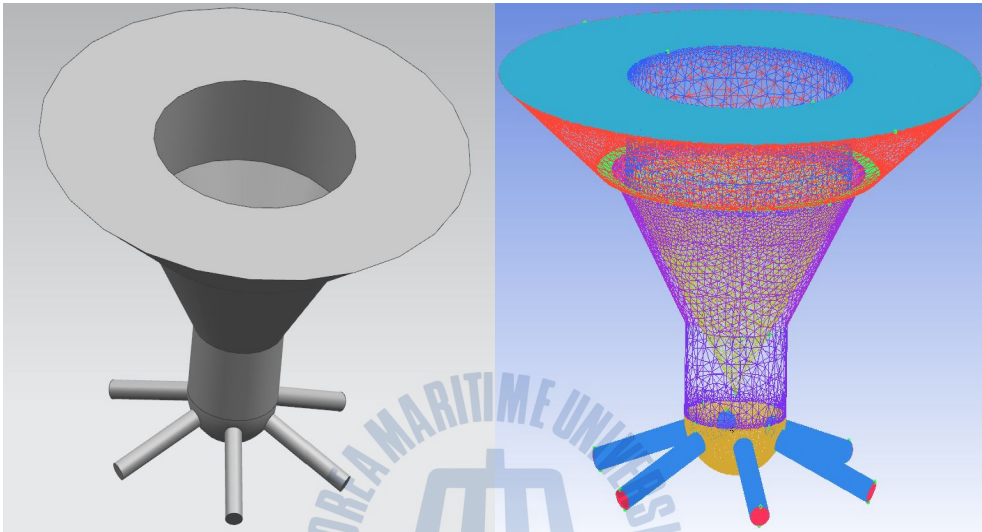
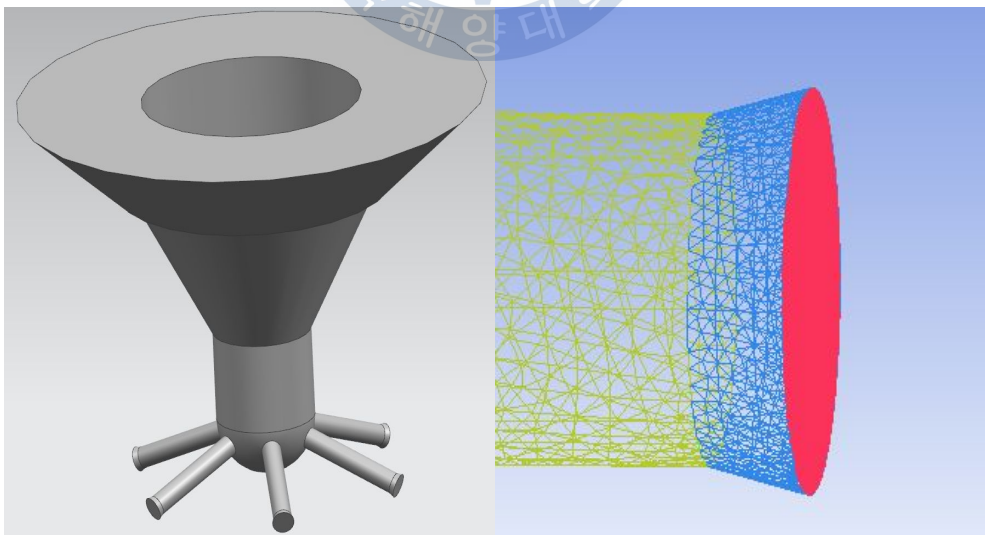
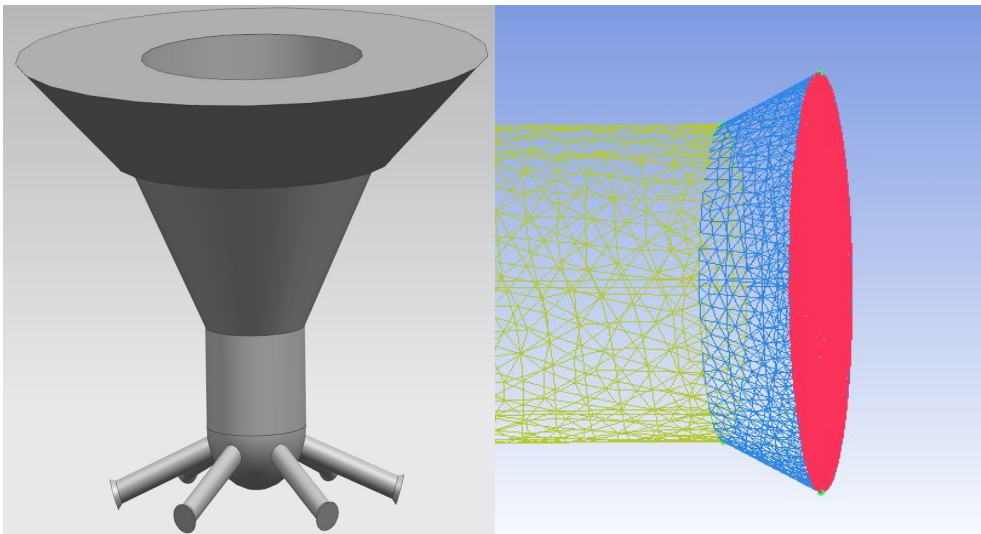


Fig. 3.31 (a) 0 degree nozzle

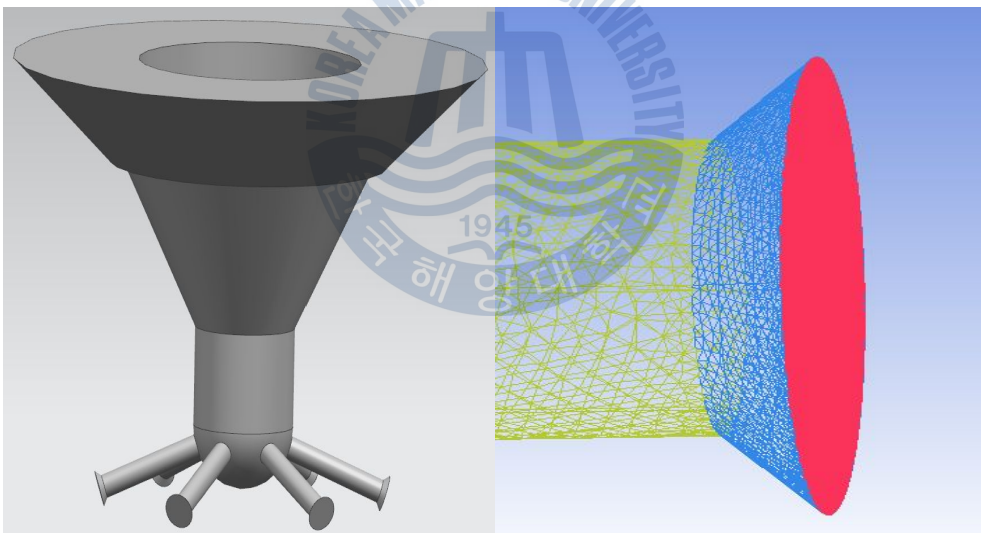


(b) 30 degree nozzle





(c) 60 degree nozzle



(d) 90 degree nozzle

Fig. 3.31 Hole exit geometry and calculation grids



### 3.3.1 압력의 변화

Fig. 3.32는 노즐 출구 각도에 따른 전체 압력분포 변화를 ANSYS의 POST를 이용하여 나타낸 것이다. 전반적으로 세 가지 경우 전부 압력이 비슷한 경향을 보이며, 노즐 출구 각도가 커지면 출구 면적이 커지므로 0도에 비해 각도가 있는 노즐들이 압력 분포가 조금 낮게 보인다. Fig. 3.33은 압력 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 출구 각도가 0도인 경우가 가장 높고 각도가 커지면서 전체 압력이 감소하는 경향을 볼 수 있다.

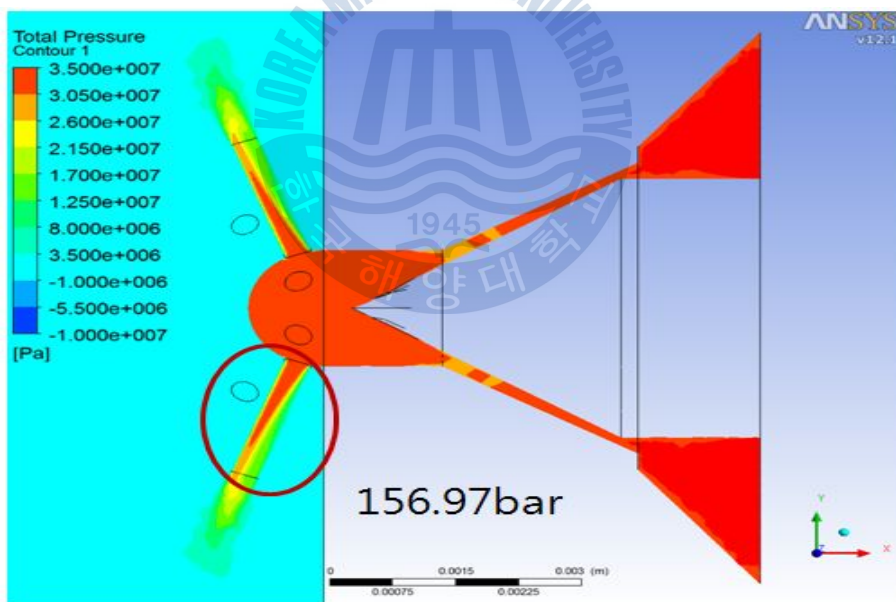
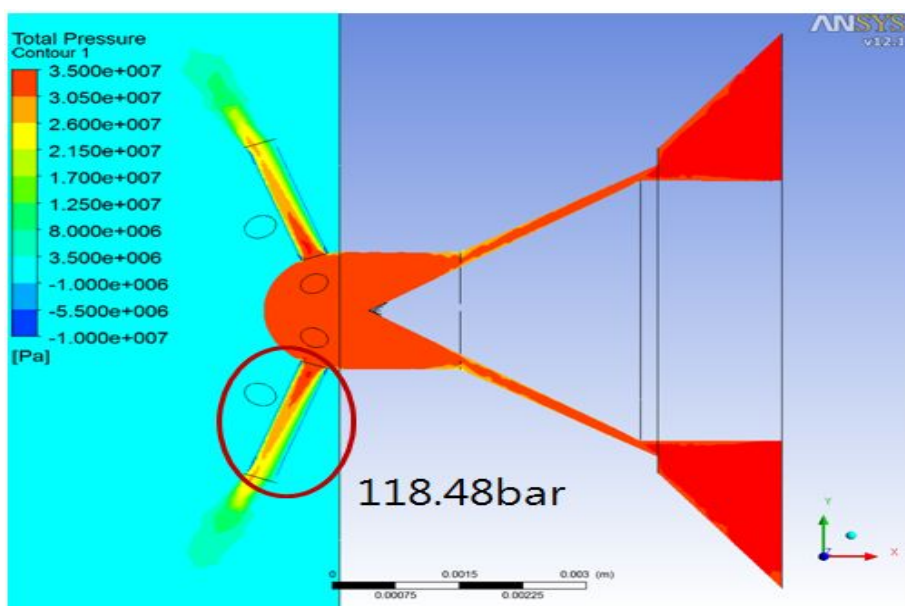
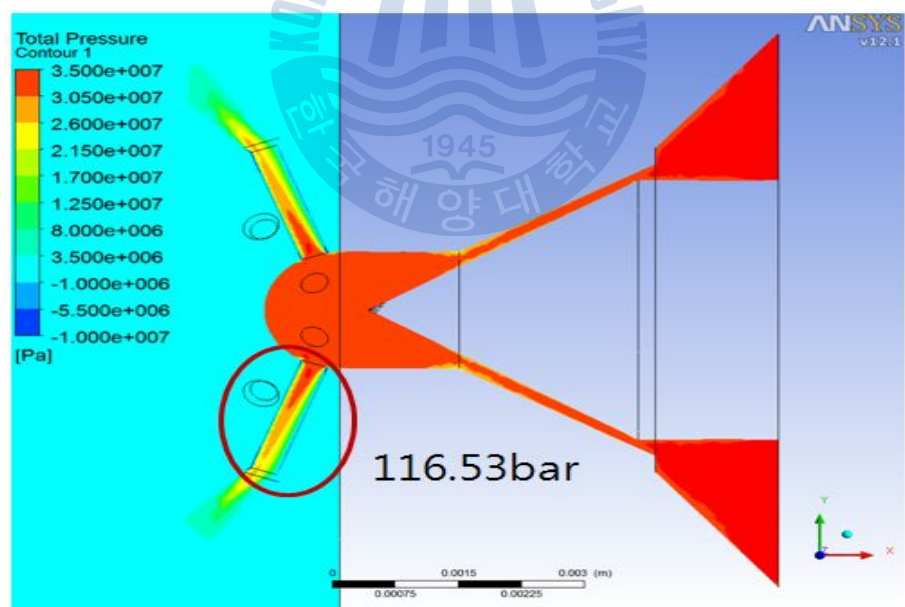


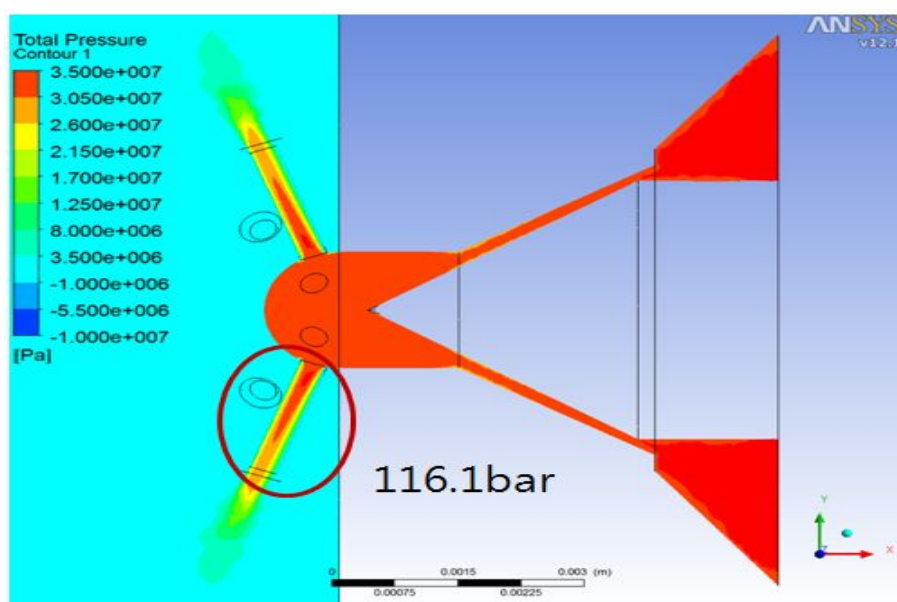
Fig. 3.32 (a) 0 degree nozzle



(b) 30 degree nozzle



(c) 60 degree nozzle



(d) 90 degree nozzle

Fig. 3.32 Variation of passage pressure in each exit angle of nozzle hole

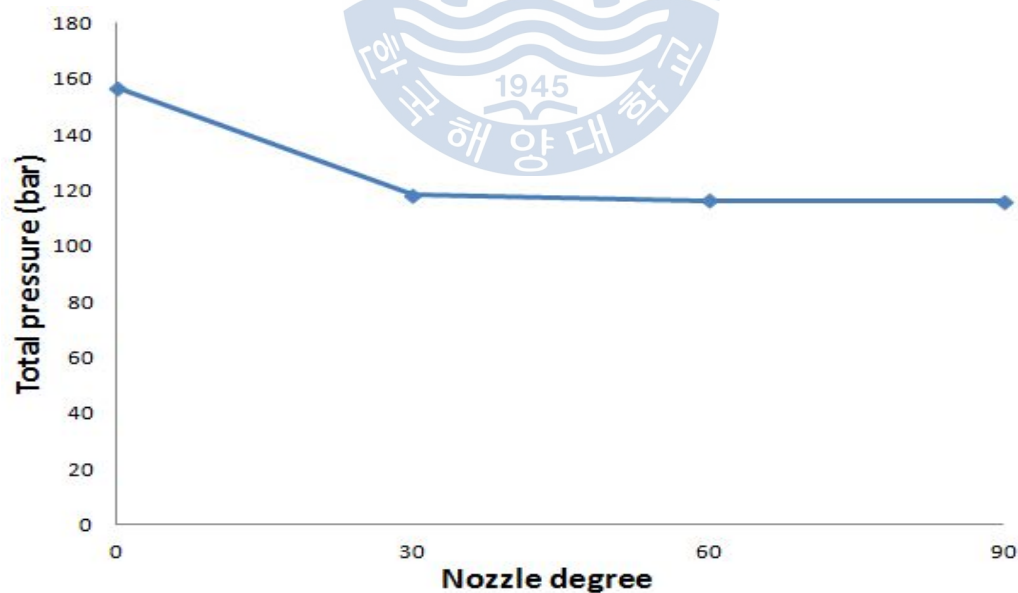


Fig. 3.33 Graph of passage pressure in each exit angle of nozzle hole

Fig. 3.34는 노즐 출구 각도에 따른 전체 압력 변화를 출구 홀 단면에서 나타낸 것이다. 출구 각도가 0도인 경우에 전체 압력 분포가 왼쪽 벽면으로 치우치다가 각도가 30도 60도 90도로 커짐에 따라 압력이 줄어들면서 압력 분포가 홀 단면의 중심으로 치우치는 경향을 볼 수 있다. Fig. 3.35는 압력 분포변화를 그래프로 나타낸 것이다. 각도가 0도에서 압력이 점점 커지면서 출구 각도가 커짐에 따라 전체 압력이 선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

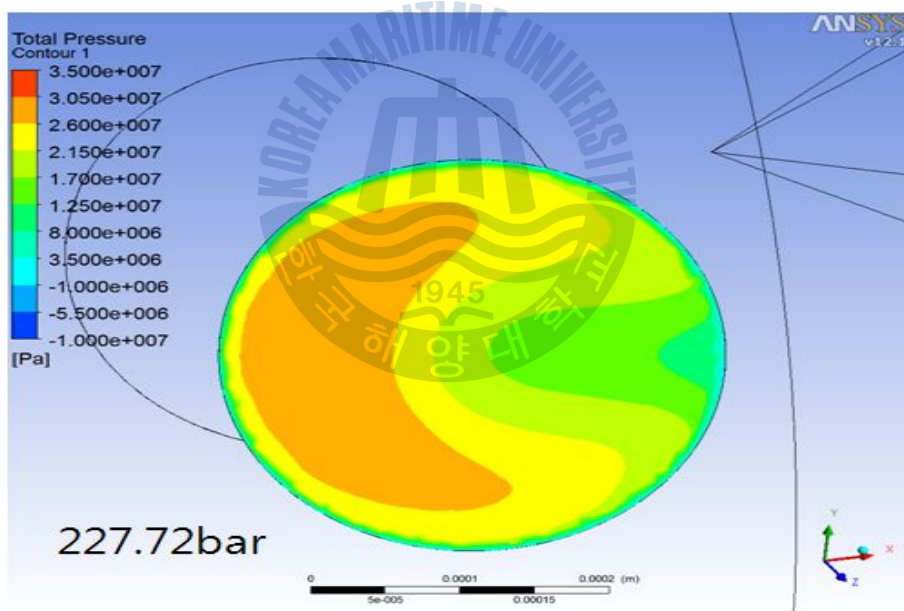
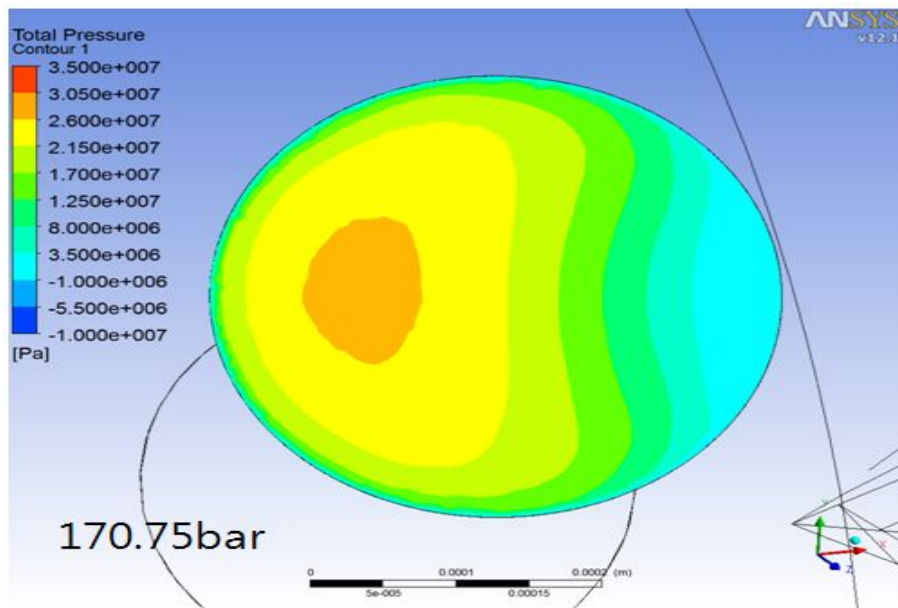
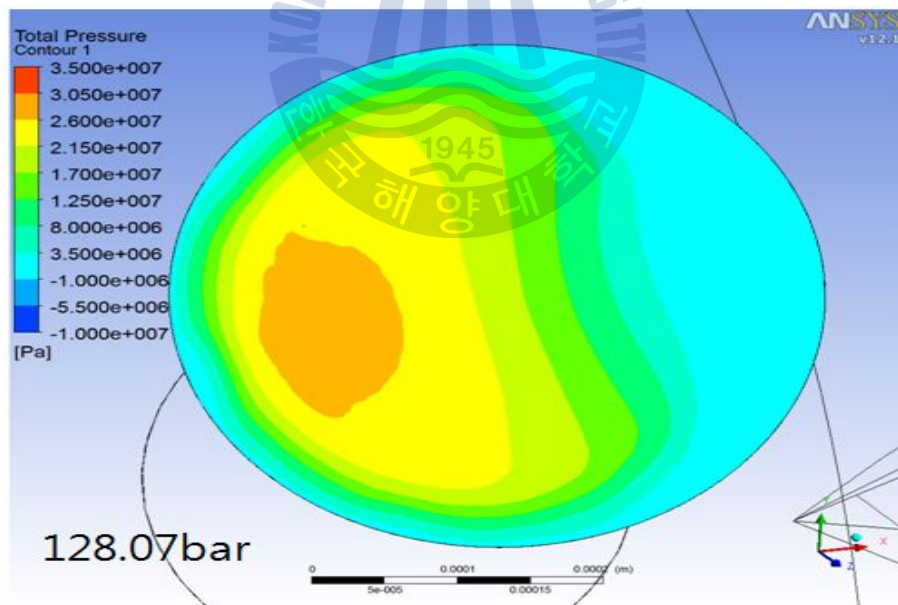


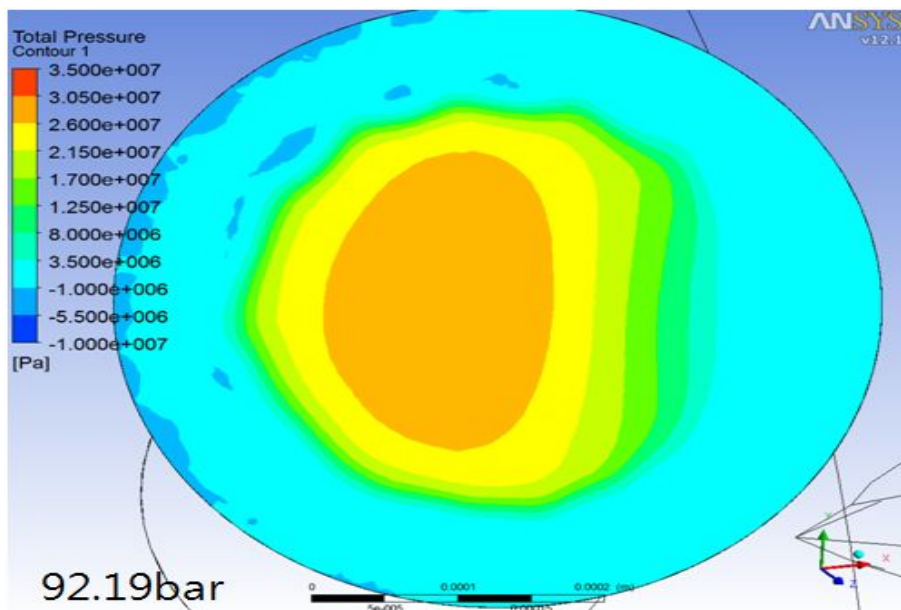
Fig. 3.34 (a) 0 degree nozzle



(b) 30 degree nozzle



(c) 60 degree nozzle



(d) 90 degree nozzle

Fig. 3.34 Variation of outlet pressure in each exit angle of nozzle hole

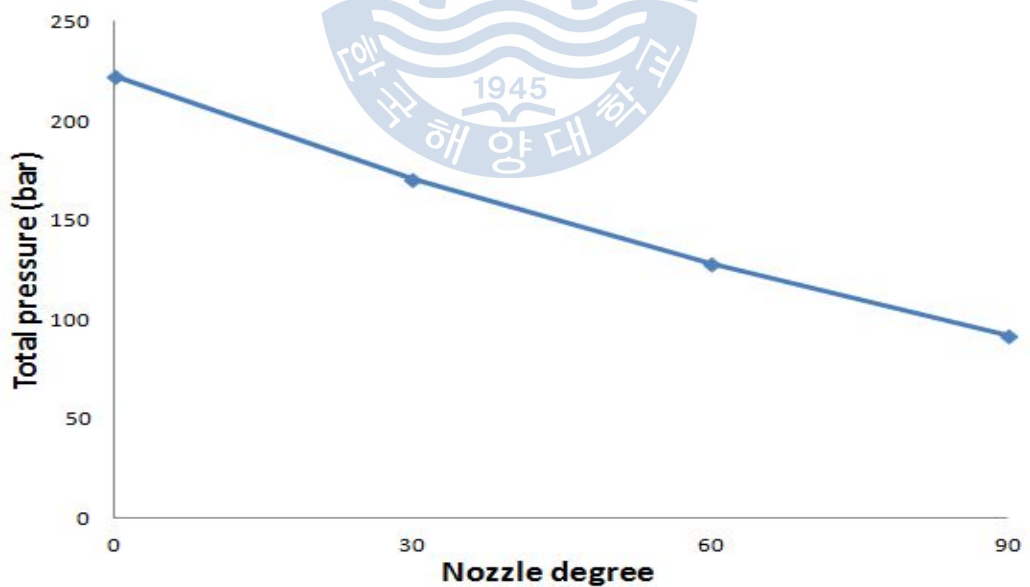


Fig. 3.35 Graph of outlet pressure in each exit angle of nozzle hole



Fig. 3.36은 부압이 발생하는 노즐의 통로에서 입구 부분의 위치를 확대한 그림이다. 노즐 각도가 없는 경우에는 부압의 크기가 가장 작으며 30도에서 부압이 증가 하며 60도일 때 부압의 크기가 최대가 되며 90도가 되면서 다시 부압이 낮아지는 경향을 볼 수 있다. 이것은 노즐 출구 각도로 인해 노즐의 출구 면적이 증가 되면서 유량이 많아져서 유체가 벽면에 충돌하는 횟수가 많아져 발생하는 것으로 사료된다. 이 벽면에 곡률 반경 (Curvature radius)을 주게 되면 부압이 줄어들 것으로 생각 된다.

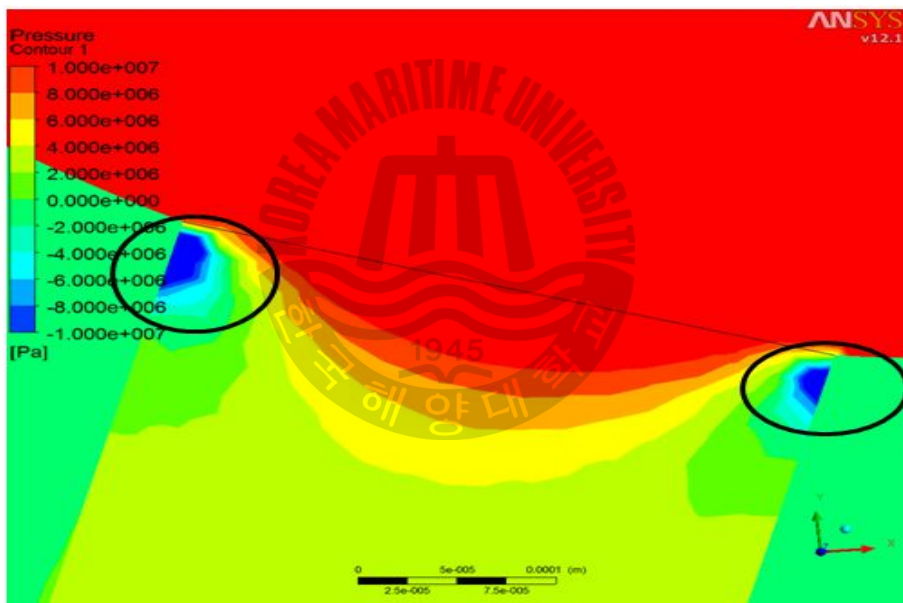
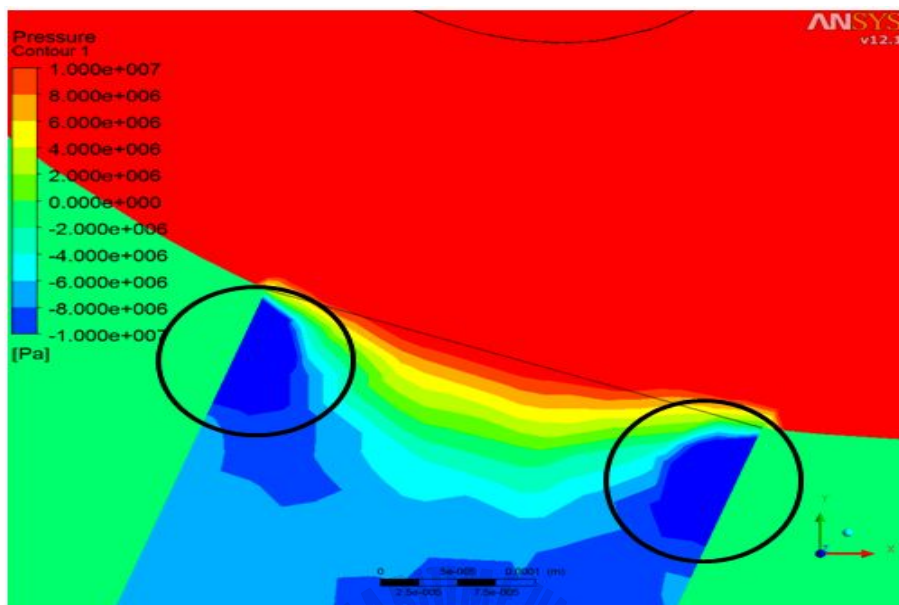
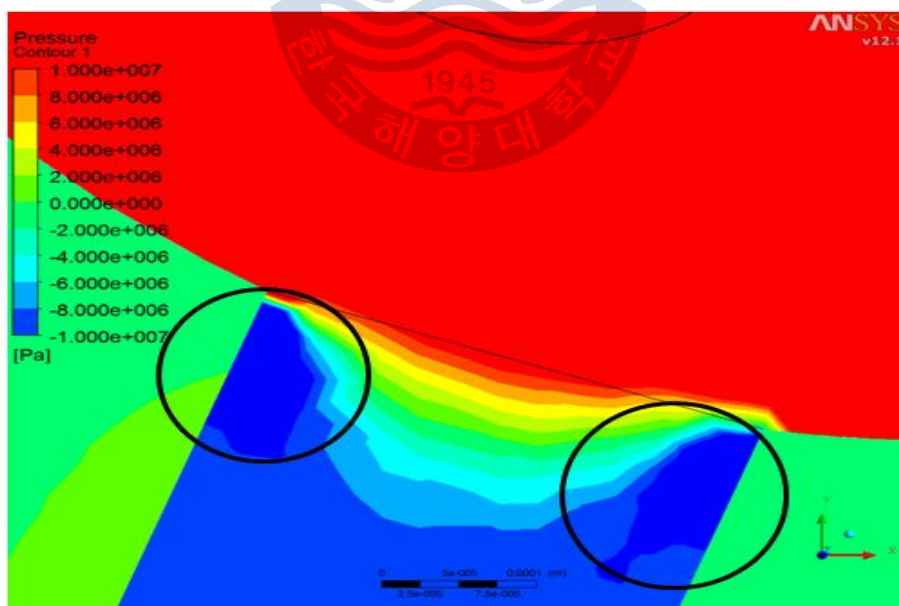


Fig. 3.36 (a) 0 degree nozzle

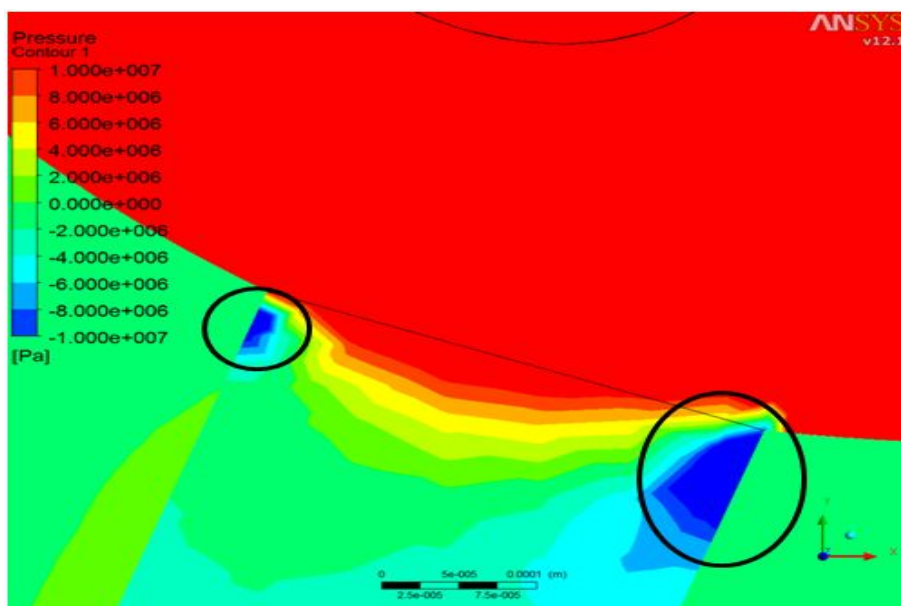




(b) 30 degree nozzle



(c) 60 degree nozzle



(d) 90 degree nozzle

Fig. 3.36 Variation of negative pressure in each exit angle of nozzle hole

### 3.3.2 유속 및 유량의 변화

Fig. 3.37은 노즐 출구 각도에 따라 노즐의 입구에서 홀까지 유체가 흐르는 통로 부분의 평균유속을 나타낸 것이며 Fig. 3.38은 평균유속을 보기 쉽게 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 보면 각도가 0인 경우가 가장 유속이 낮으며 30도에서 증가하다 각도가 60도 일 때 유속이 가장 높게 나타나며 90도가 되면서 유속이 다시 감소하는 경향을 보인다.

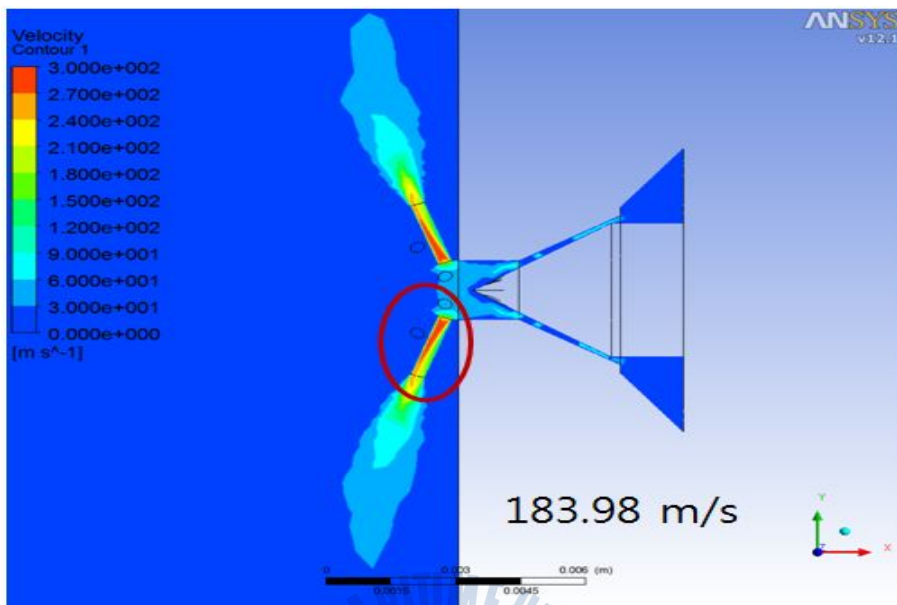
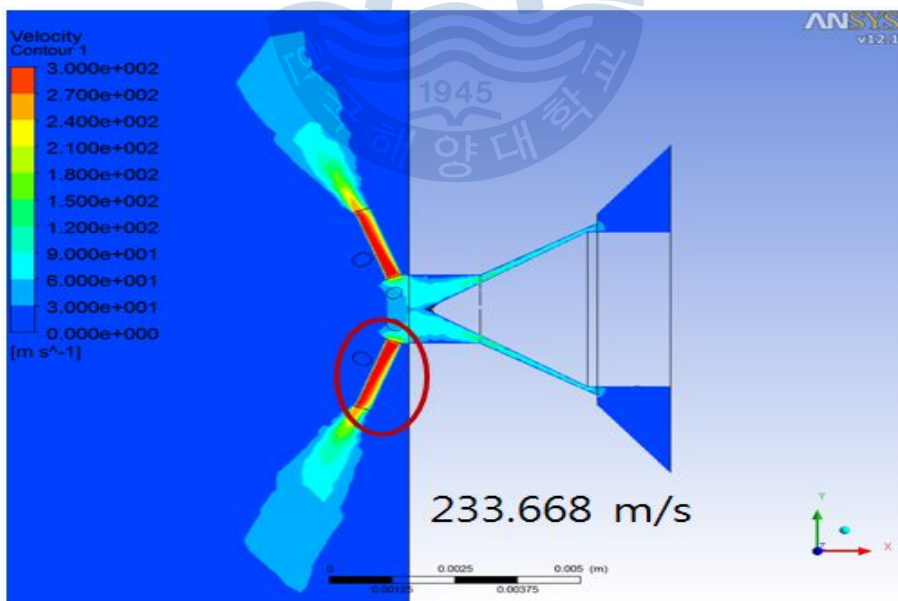
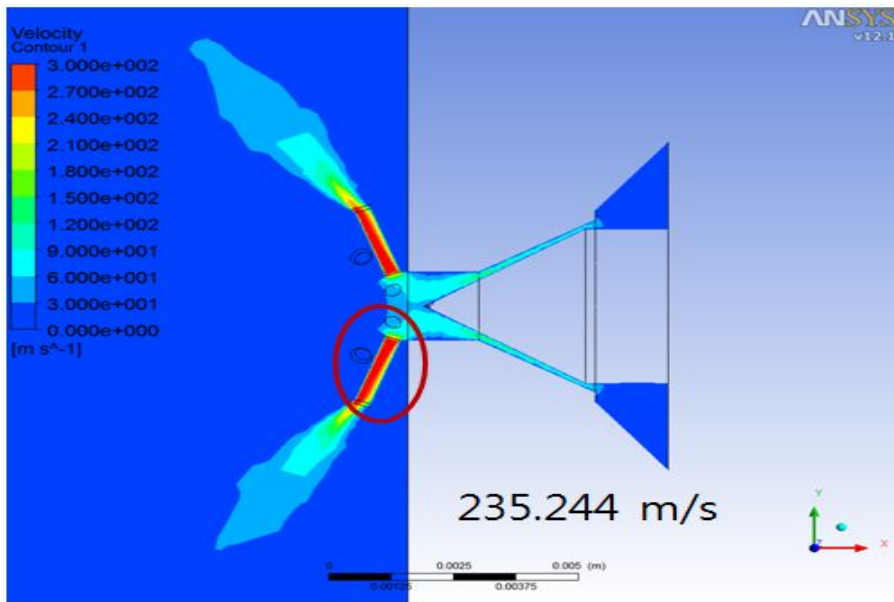


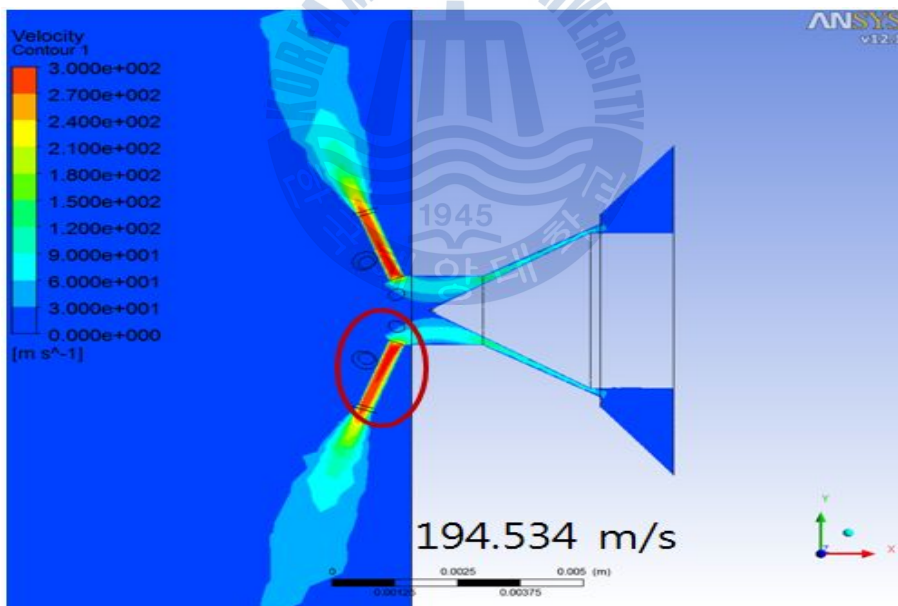
Fig. 3.37 (a) 0 degree nozzle



(b) 30 degree nozzle



(c) 60 degree nozzle



(d) 90 degree nozzle

Fig. 3.37 Variation of passage flow velocity in each exit angle of nozzle hole

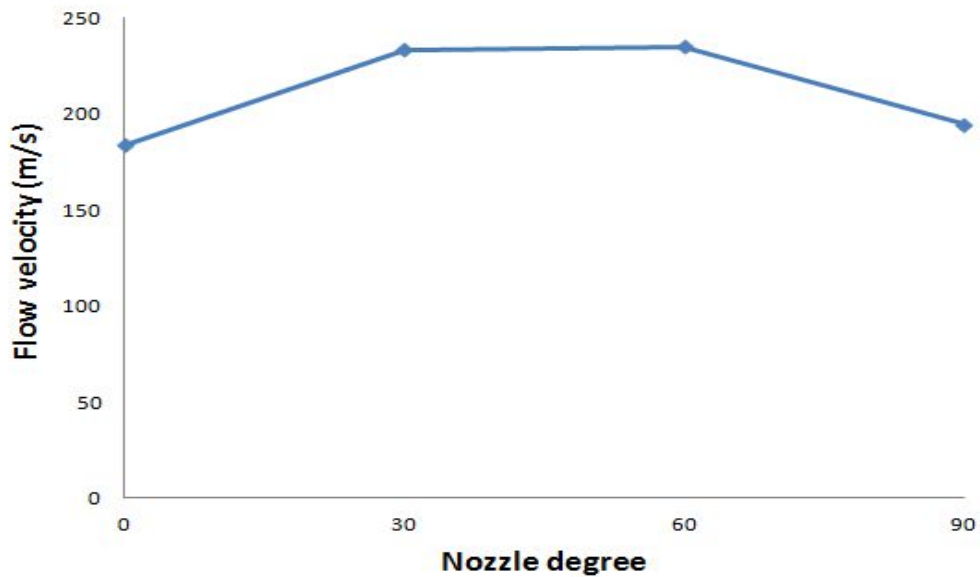


Fig. 3.38 Graph of passage flow velocity in each exit angle of nozzle hole

Fig. 3.39은 노즐 출구 각도에 따라 노즐 홀 출구단면에서의 평균유속과 유량을 나타낸 것이다. Fig. 3.40은 출구의 평균유속을 그래프로 나타낸 것이다. 출구에서는 노즐 각도 없는 기본 노즐의 경우가 가장 유속이 빠르며 각도가 30도, 60도, 90도로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 이것은 노즐 각도가 커짐에 따라 출구 면적이 커지게 되므로 유속이 점차 감소하는 것으로 사료된다. Fig. 3.41은 출구에서 연료의 질량 유량을 그래프로 나타낸 것이다. 각도가 0인 경우가 가장 유량이 적으며 30도 일 때가 가장 많으며 60도, 90도로 각도가 커지면서 점차 유량이 조금씩 줄어드는 경향을 보인다. 다른 경우와 달리 90도의 경우는 출구 면적이 가장 커서 주변의 많은 공기가 유입이 되어 유동 저항이 커져서 유량과 유속이 감소한 것으로 사료된다.

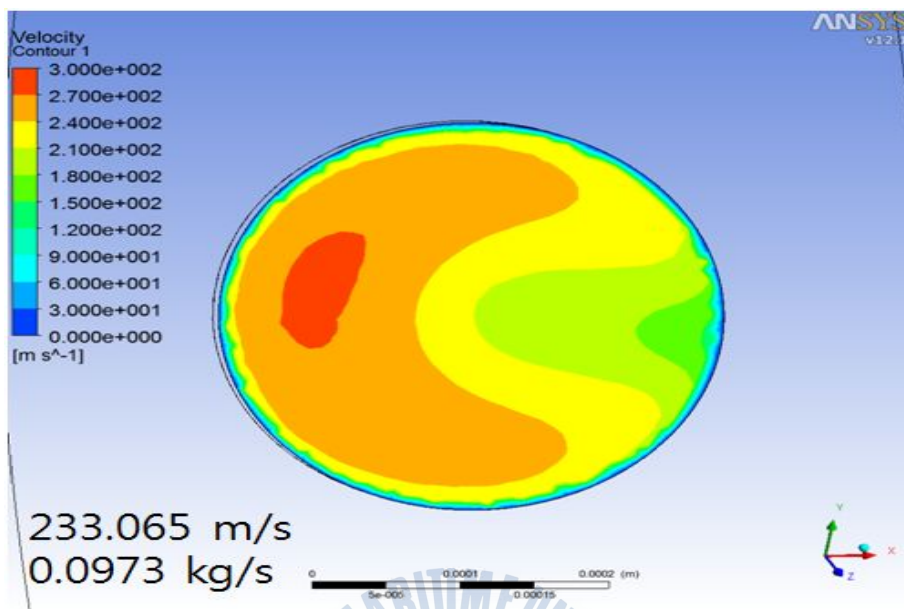
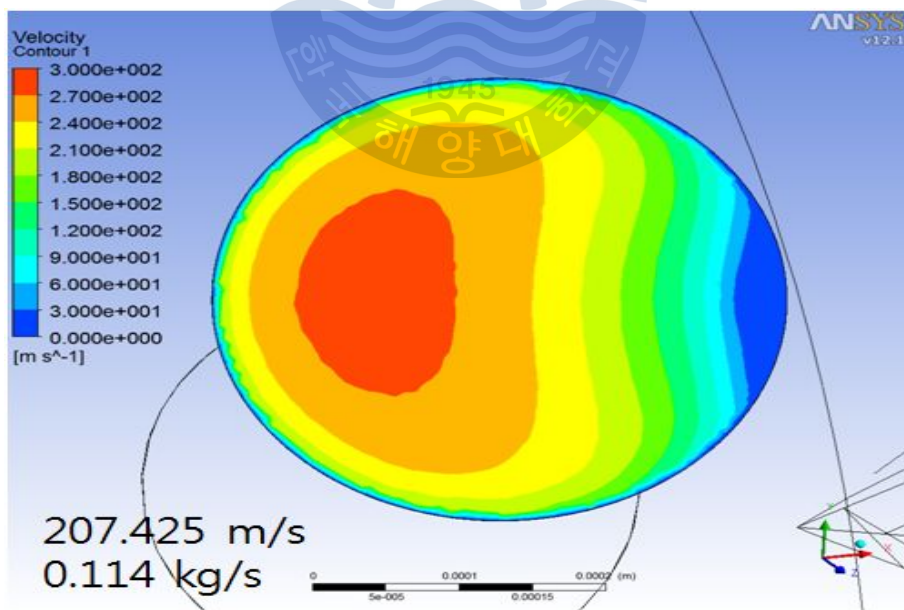
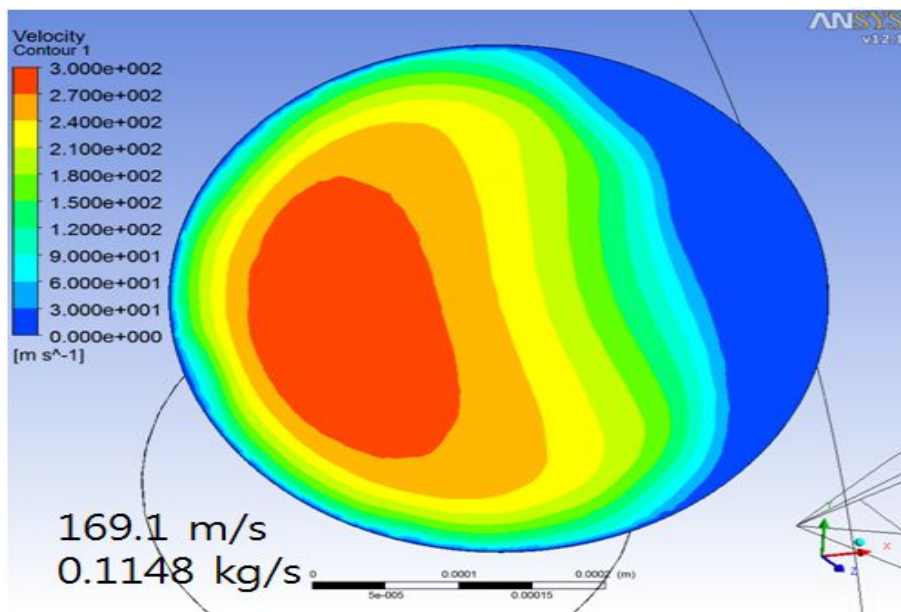


Fig. 3.39 (a) 0 degree nozzle

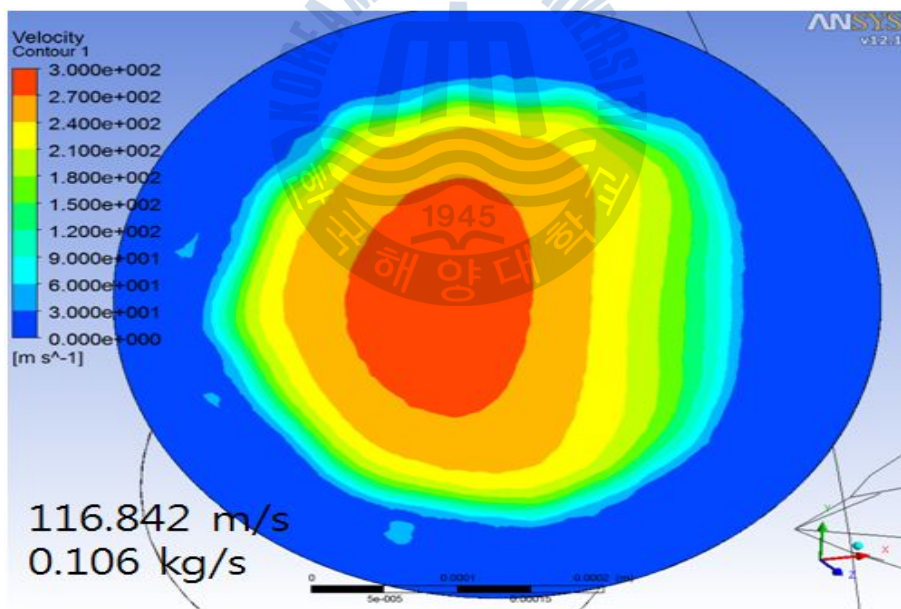


(b) 30 degree nozzle





(c) 60 degree nozzle



(d) 90 degree nozzle

Fig. 3.39 Variations of outlet flow velocity and mass flow rate in each exit angle of nozzle hole



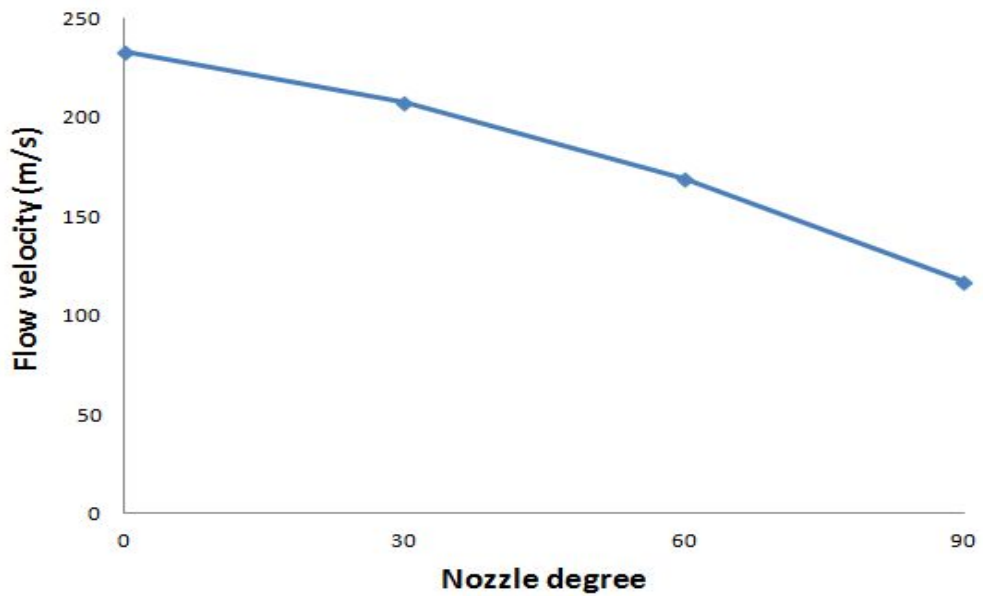


Fig. 3.40 Graph of outlet flow velocity in each exit angle of nozzle hole

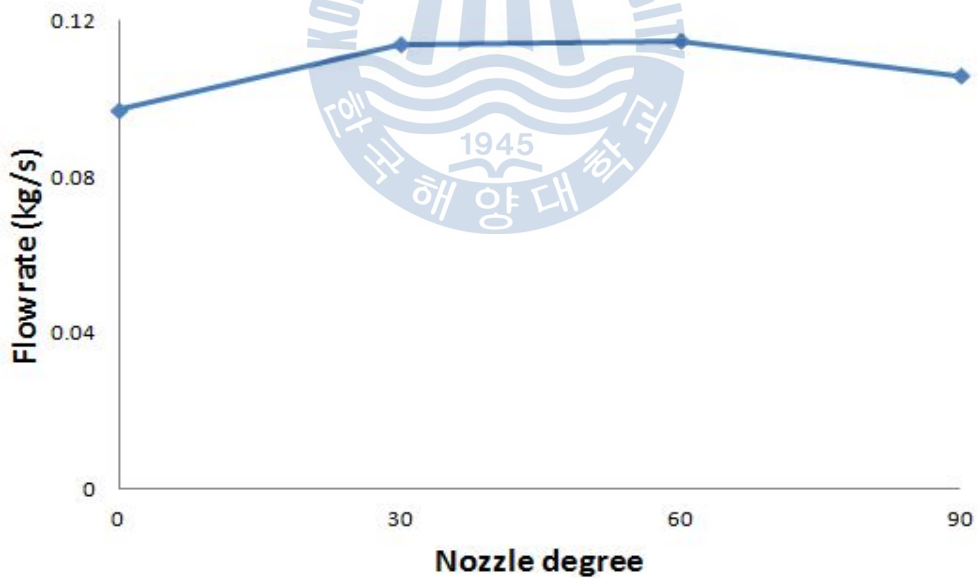


Fig. 3.41 Graph of outlet mass flow rate in each exit angle of nozzle hole

Fig. 3.42는 노즐의 출구 부분의 유동을 알아보기 위하여 벡터로 표현한 그림이다. 0도인 경우는 최대 161m/s 속도로 분사가 되며 출구에 각도가 없어서 유동이 직진성만을 보여준다. 30도의 경우는 최대 190m/s의 속도로 분사가 되며 각도가 약간 상부로 치우쳐 지면서 0도 보다는 조금 넓게 분사가 된다. 60도의 경우는 최대 188m/s의 속도로 분사가 되며 출구 각도가 30도 보다 좀 더 커졌기 때문에 주변의 공기가 노즐 홀로 유입이 되면서 스윙 유동이 생겨서 넓게 분무가 형성 된다. 90도의 경우는 최대 170m/s의 크기로 분사되고 스윙 유동이 벽면 양쪽으로 강하게 발생 되면서 유동을 중앙으로 밀어내게 되어 유동이 가운데로 몰리는 경향을 보인다.

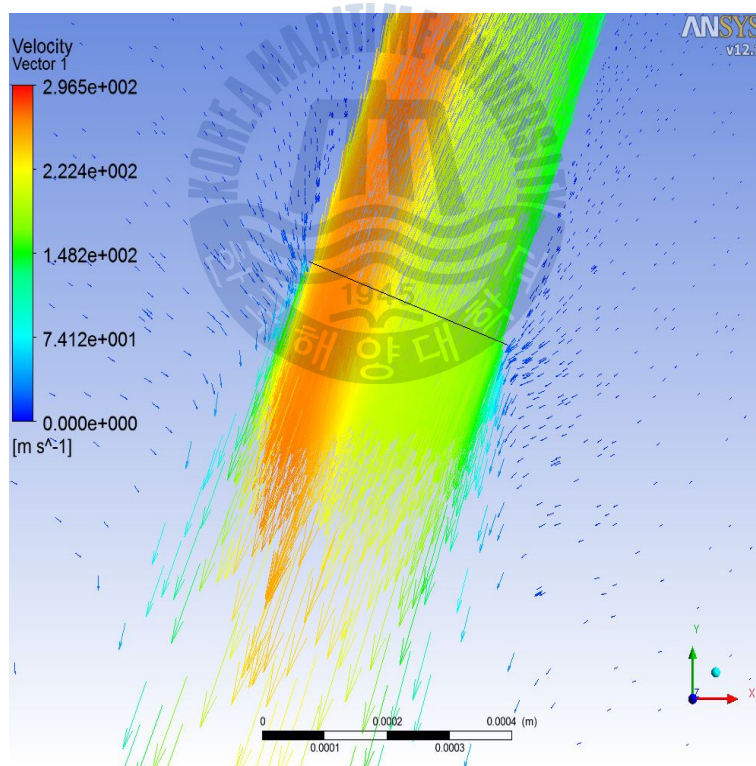
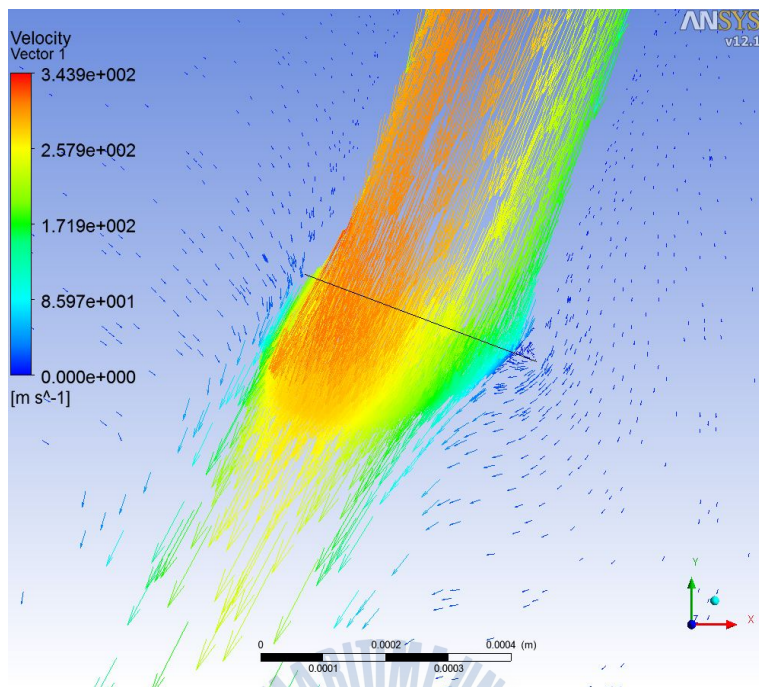
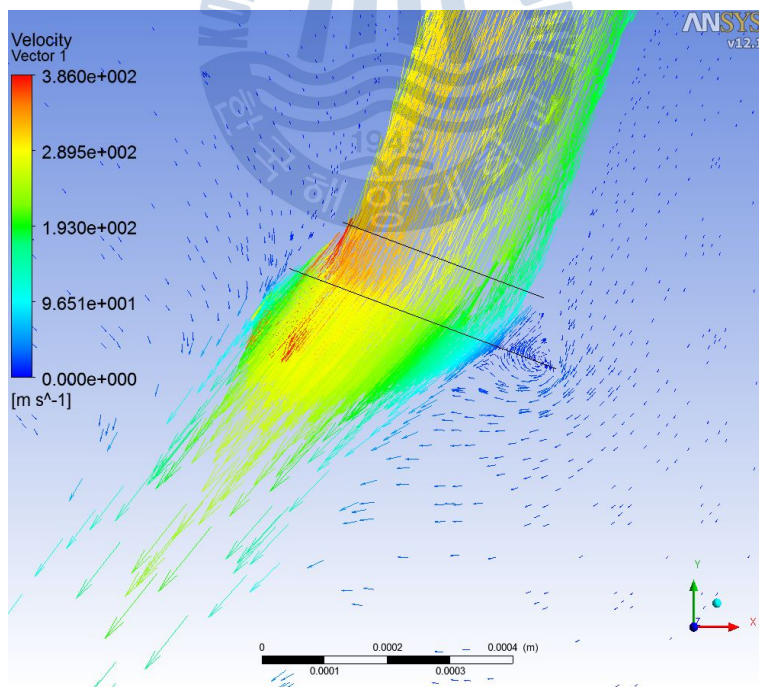


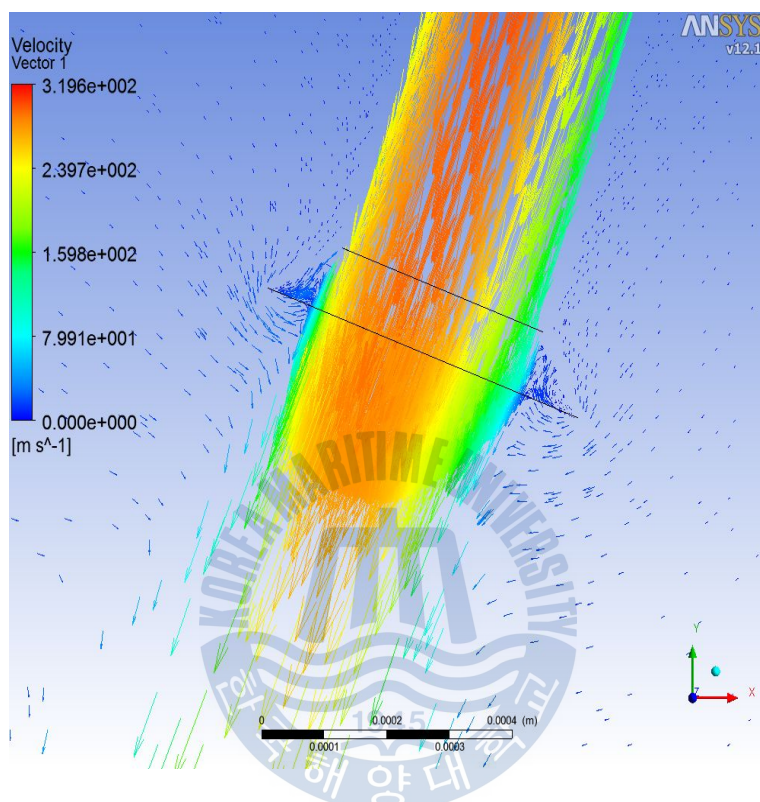
Fig. 3.42 (a) 0 degree nozzle



(b) 30 degree



(c) 60 degree



(d) 90 degree

Fig. 3.42 Variation of outlet flow vector in each exit angle of nozzle hole

### 3.3.3 계산 결과 요약

노즐 출구 각도에 따른 시뮬레이션 해석결과 노즐 입구에서 홀의 출구 구간  
간의 평균 압력이 노즐이 각도가 없는 경우가 가장 높으며 나머지 30도,  
60도, 90도 세 가지 경우는 거의 비슷하다. 연료가 분사 되는 출구 홀 단  
면에서의 압력은 노즐 출구 각도가 커질수록 선형적으로 압력이 감소되는  
경향을 볼 수 있다. 그리고 벽면에 발생하는 부압의 크기는 0도 일 때가  
가장 낮으며 60도 일 때 부압의 크기가 가장 크며 90도와 30도의 경우 0도  
일 때 보다는 크지만 60도 일 때보다 작은 것을 알 수 있다. 그리고 유체  
가 흐르는 노즐 입구에서 홀 출구까지의 평균 유속은 0도인 경우가 가장  
느리며 30도와 60도인 경우가 가장 빠르다. 출구 단면에서의 유속은 압력  
과 마찬가지로 각도가 커짐에 따라 선형적으로 감소하지만 유량의 경우는  
0도인 경우가 가장 작고 30도와 60도인 경우가 가장 많다. 출구 부분의 유  
동의 경우 0도의 경우는 유동의 직진성 만을 보이며 30도의 경우는 주위의  
공기가 소량 유입이 되며 0도에 비해 유동이 편향되면서 다소 넓게 분산된  
다. 60도는 많은 주위공기가 유입되어 스월이 발생하며 유동이 넓게 확산  
된다. 90도의 경우는 0도의 경우와 유사하게 스월이 균형을 유지하여 직진  
하는 유동의 형태를 나타낸다. 이상의 데이터들의 분석결과 주위 공기의  
유동을 활성화하여 분무 액적들의 넓은 확산을 방지시키기 위해서 출구 각  
60도인 경우가 가장 적합한 것으로 판단된다.



### 3.4 노즐 홀 입구 곡률반경의 크기에 따른 계산 결과 및 고찰

Fig. 3.43은 노즐 곡률반경 크기에 따른 모델링 형상과 격자를 생성시킨 형상이다. 격자의 개수는 평균 180만개 정도이다.

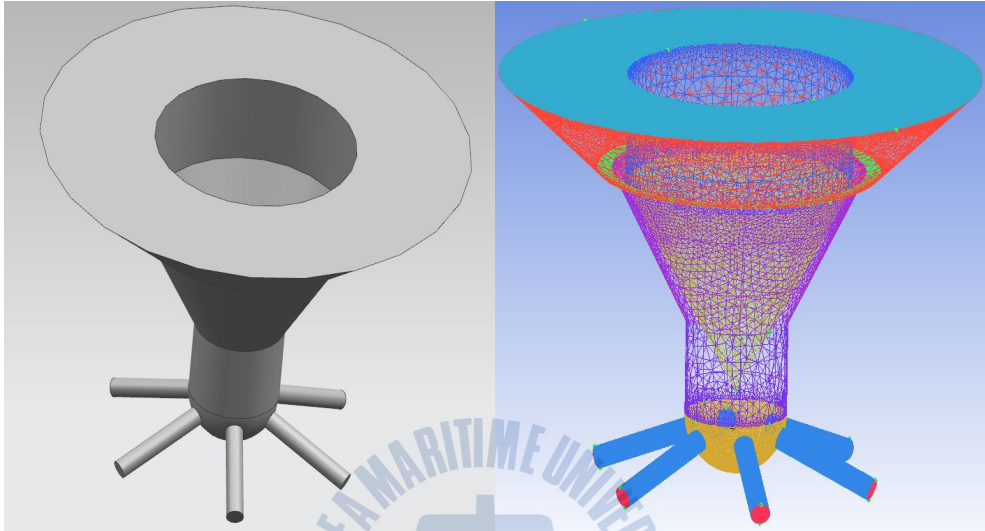
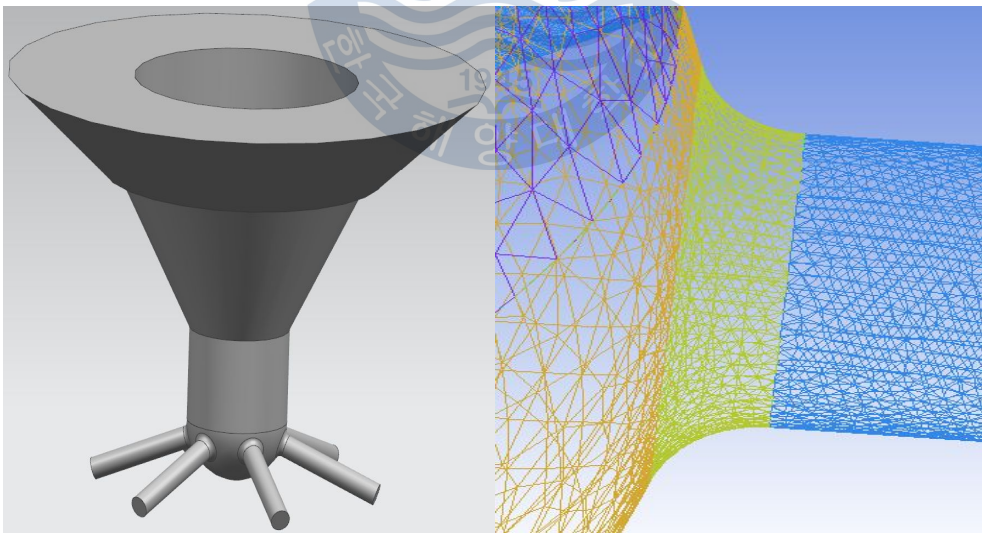
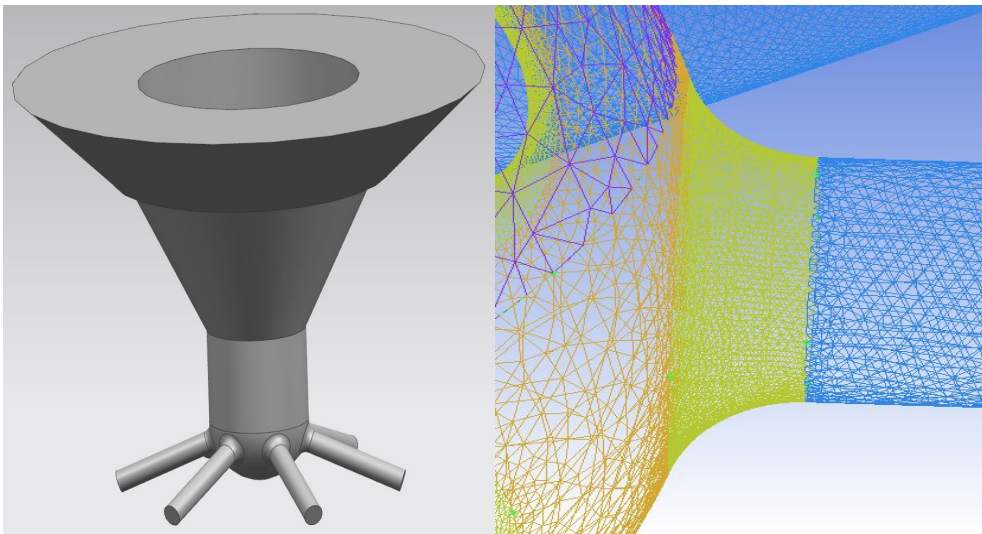


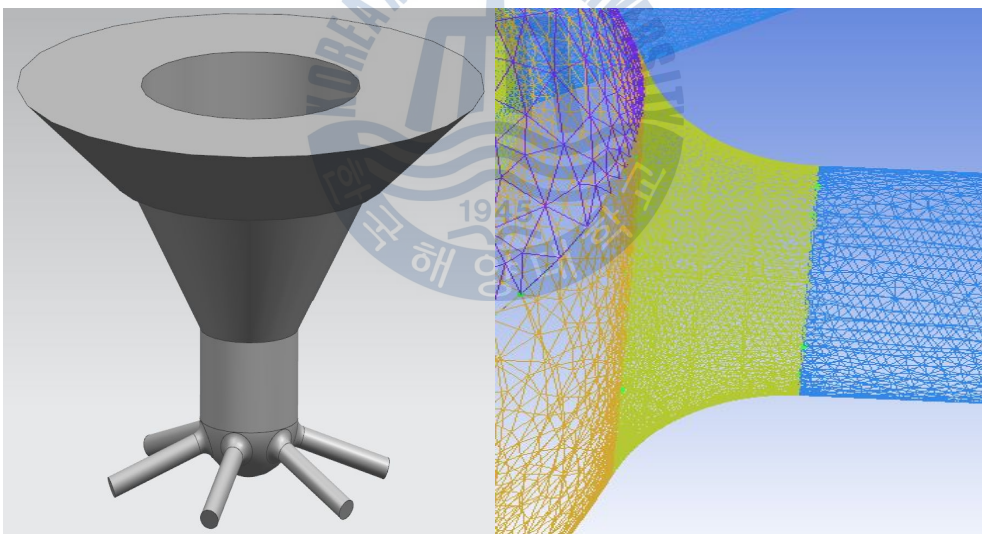
Fig. 3.43 (a) Curvature radius of 0mm



(b) Curvature radius of 0.1mm



(c) Curvature radius of 0.15mm



(d) Curvature radius of 0.2mm

Fig. 3.43 Curvature radius geometry and calculation grids



### 3.4.1 압력의 변화

Fig. 3.44는 노즐 곡률반경 크기에 따른 전체 압력의 변화를 ANSYS의 POST를 이용하여 나타낸 것이다. 전체 압력 분포가 곡률 반경이 없을 때 보다 곡률 반경을 준 경우가 더 크게 나온다. Fig. 3.45는 압력 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 곡률 반경 크기가 0일 때 보다 0.1mm에서 압력이 높아지며 0.15mm, 0.2mm로 커지면서 압력이 상승하는 경향을 볼 수 있다.

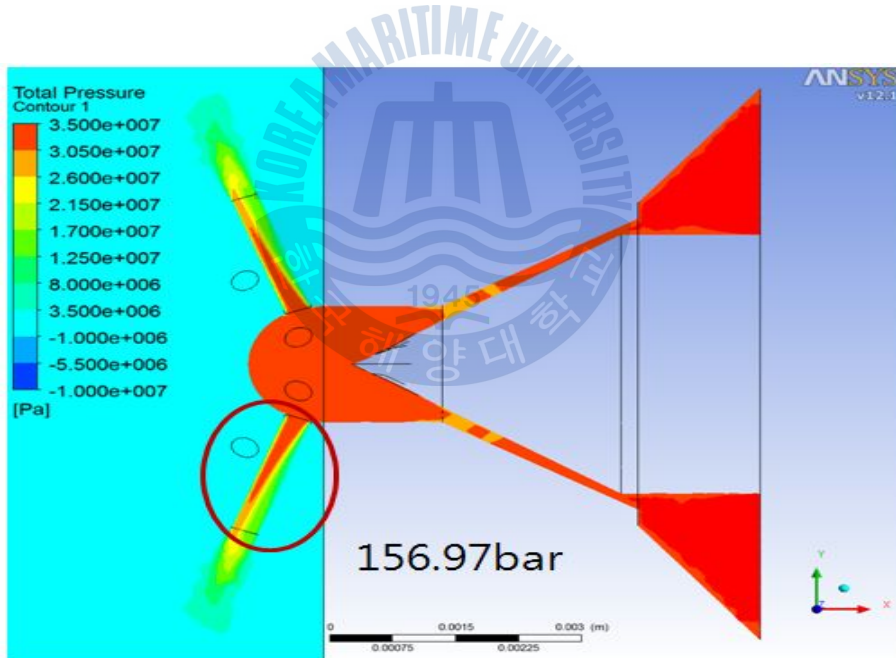
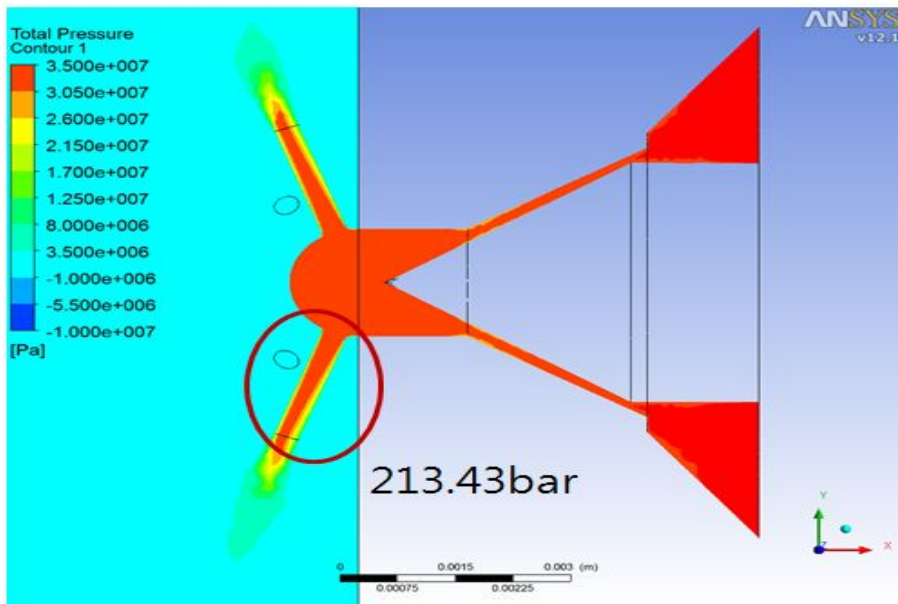
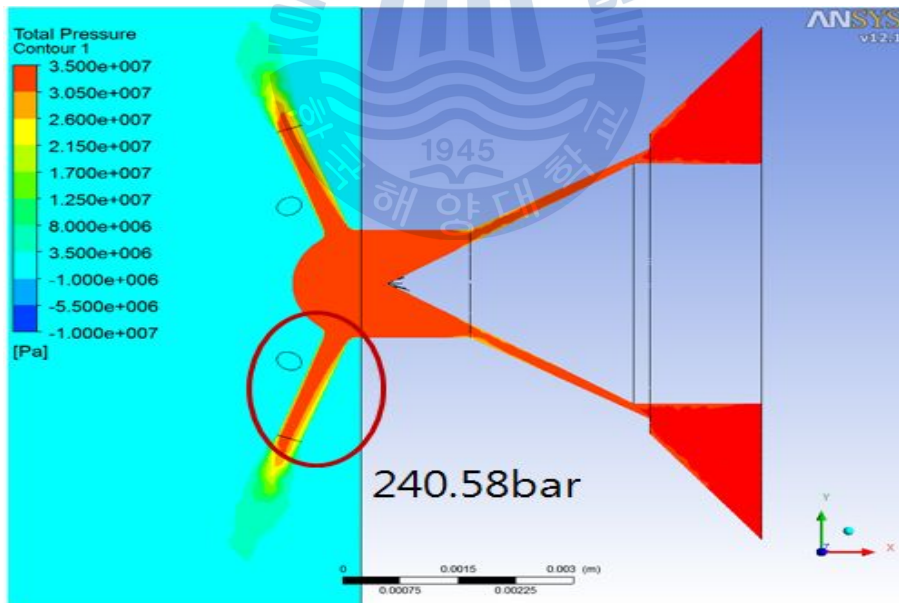


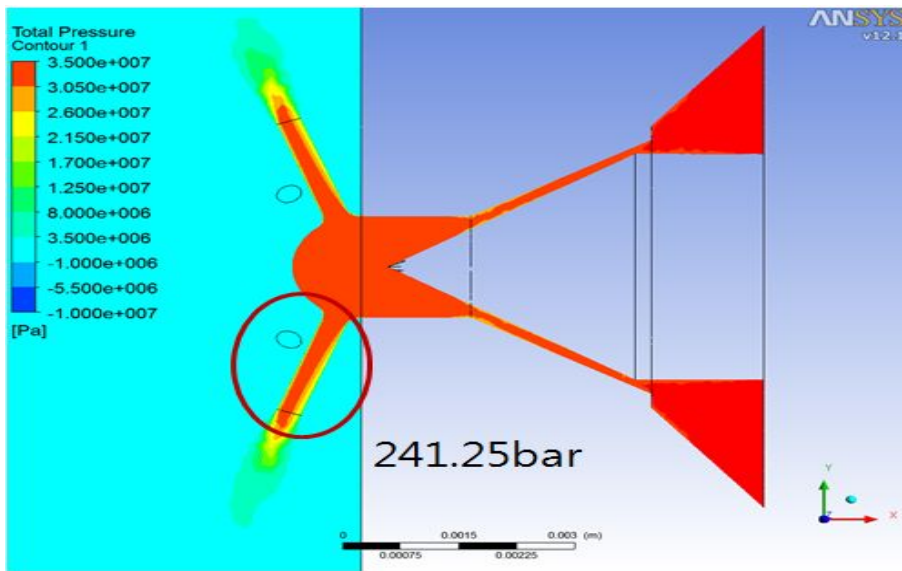
Fig. 3.44 (a) Curvature radius of 0mm



(b) Curvature radius of 0.1mm



(c) Curvature radius of 0.15mm



(d) Curvature radius of 0.2mm

Fig. 3.44 Variation of passage pressure in each curvature radius at nozzle

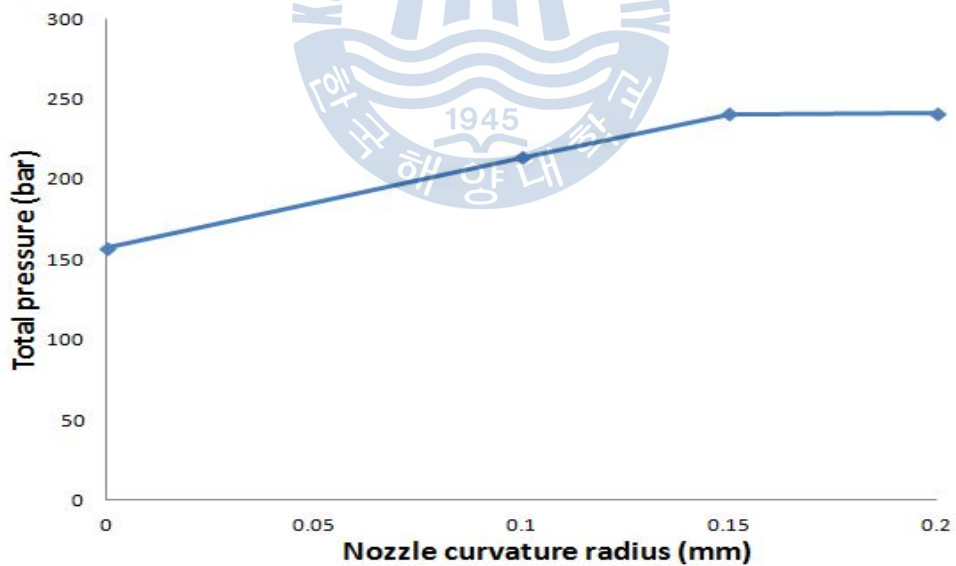


Fig. 3.45 Graph of passage pressure in each curvature radius at nozzle

Fig. 3.46은 노즐 입구 곡률 반경 크기에 따른 압력 변화를 출구 홀 단면에서 나타낸 것이다. 곡률 반경이 없는 0인 경우에 비해 곡률 반경을 준 경우가 전체 압력이 높게 나타나며 곡률 반경 크기가 0.1mm 일때는 높은 압력이 노즐 출구면 중심으로 분포 되어 있지만 곡률 반경 크기가 0.15mm, 0.2mm로 커지면서 왼쪽 벽으로 치우치는 경향을 볼 수 있다. Fig. 3.47은 압력 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 곡률 반경이 없는 경우에 비해 곡률 반경을 준 경우가 압력이 크게 증가하며 곡률반경 크기가 0.15mm에서 0.2mm로 가면서 거의 전체 압력이 일정해지는 것을 볼 수가 있다. 이것은 곡률 반경을 주게 되어 벽면의 부압이 발생하는 구간이 줄어들게 되면서 압력이 커지는 것으로 사료된다.

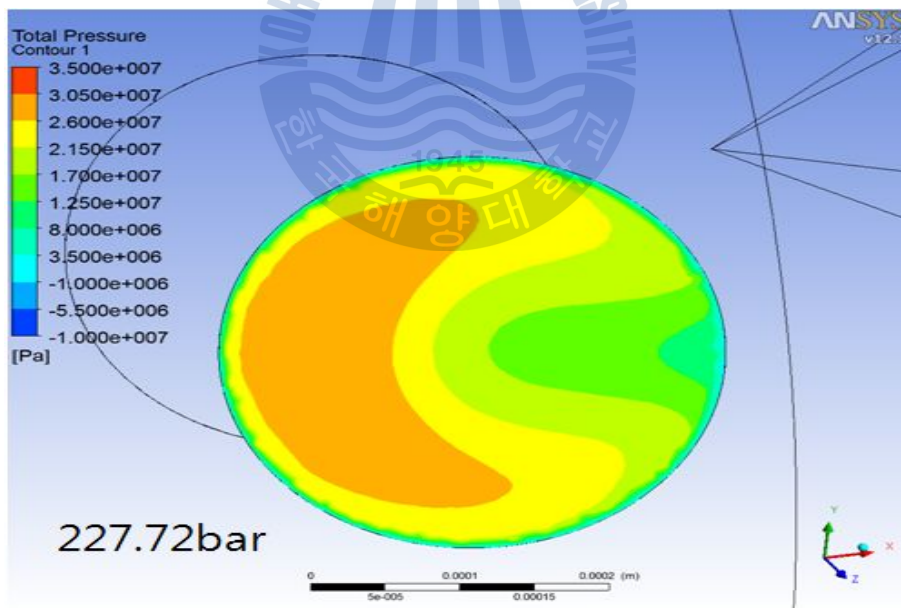
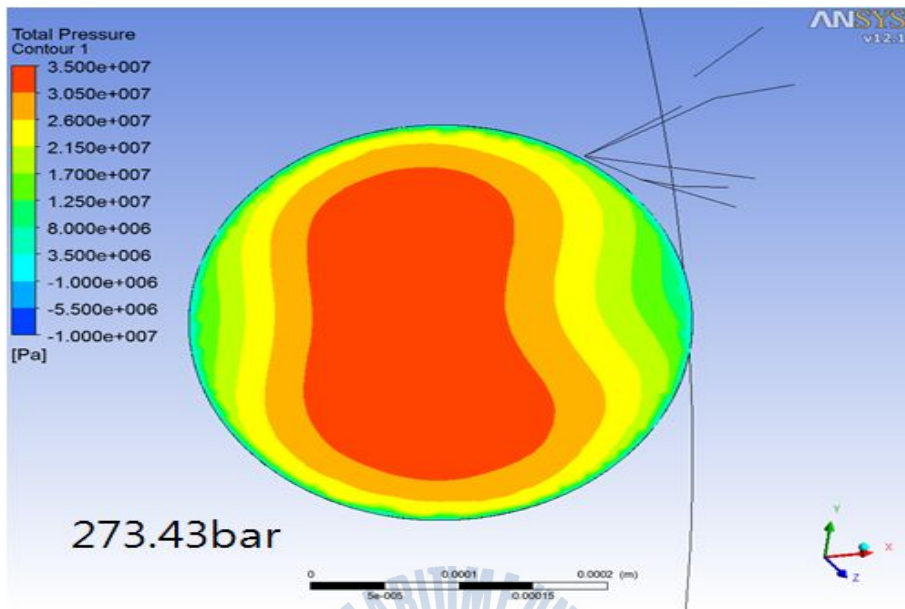
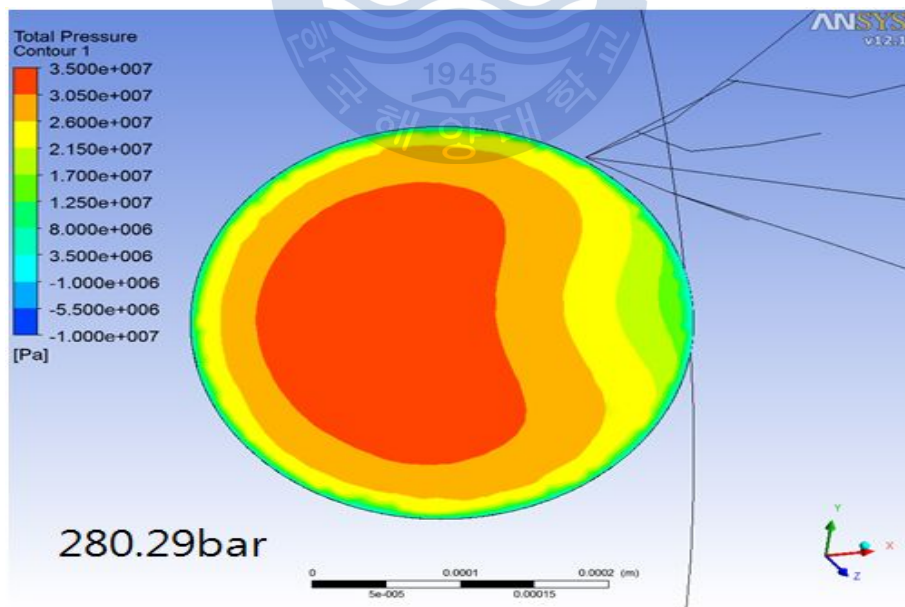


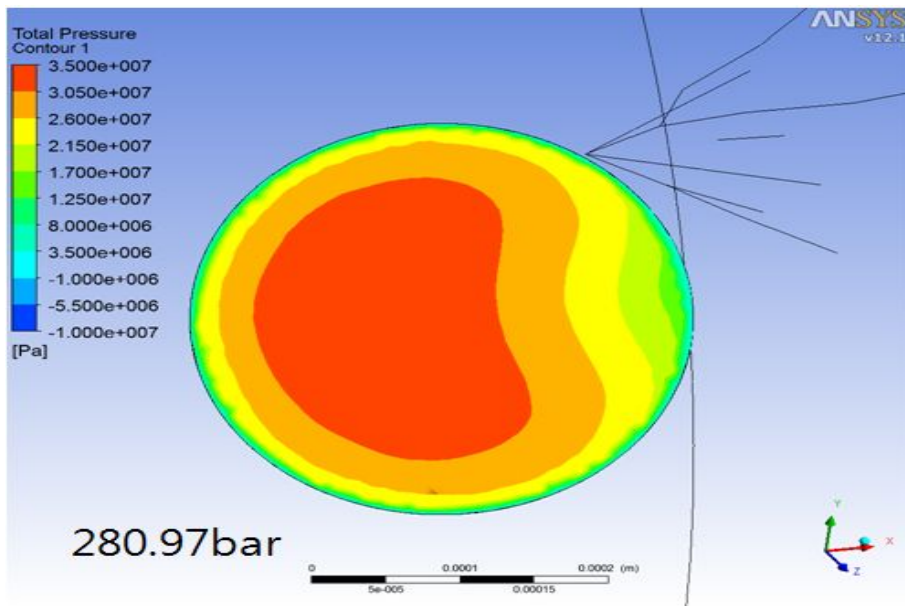
Fig. 3.46 (a) Curvature radius of 0mm



(b) Curvature radius of 0.1mm



(c) Curvature radius of 0.15mm



(d) Curvature radius of 0.2mm

Fig. 3.46 Variation of outlet pressure in each curvature radius at nozzle

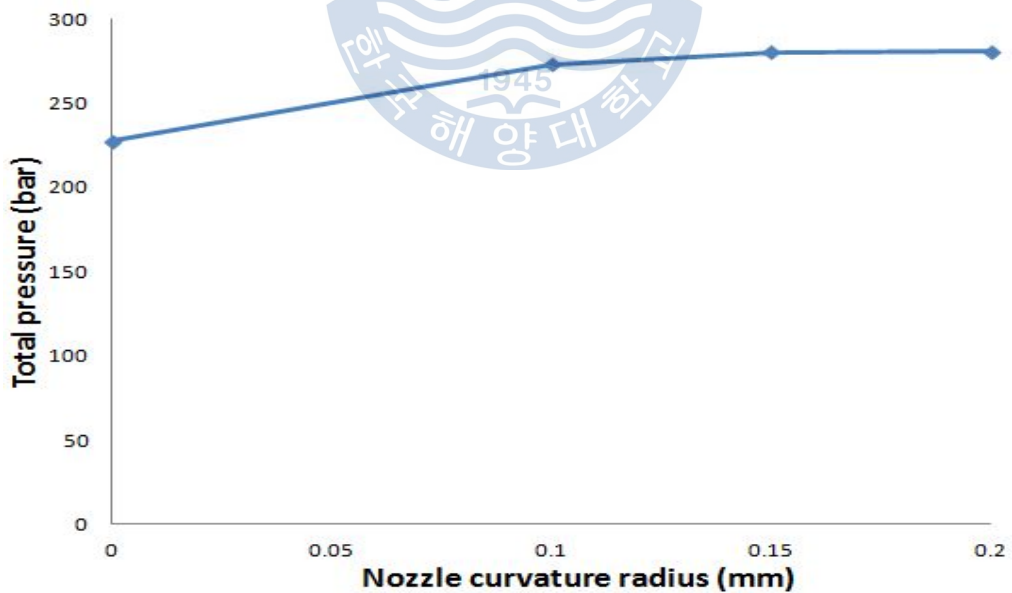


Fig. 3.47 Graph of outlet pressure in each curvature radius at nozzle



Fig. 3.48은 노즐에서 부압이 발생 하는 입구부분의 위치를 확대한 그림이다. 곡률 반경을 주지 않는 경우에는 두 곳에서 큰 부압이 발생하는 것을 볼 수 있고, 곡률 반경을 주게 되면서 부압이 줄어들게 된다. 곡률반경이 0.1mm인 경우는 왼쪽 보다 오른쪽 벽에서 부압이 발생하는 것을 볼 수 있고, 곡률 반경이 0.15mm가 되면서 부압의 크기가 감소하다가 곡률 반경이 0.2mm가 되면서 부압이 거의 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 노즐의 벽면에 곡률 반경을 주게 되면 확실히 부압을 줄일 수 있다고 사료된다.

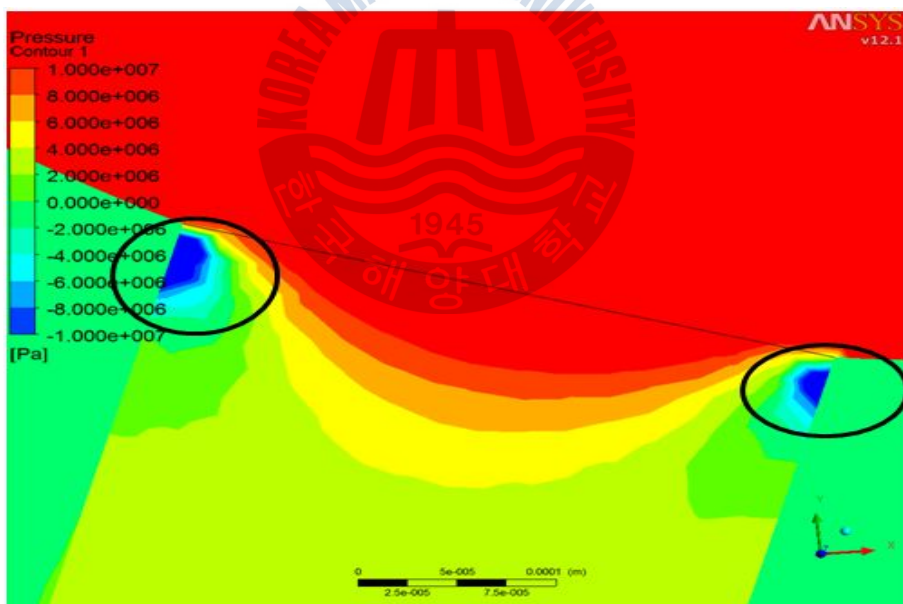
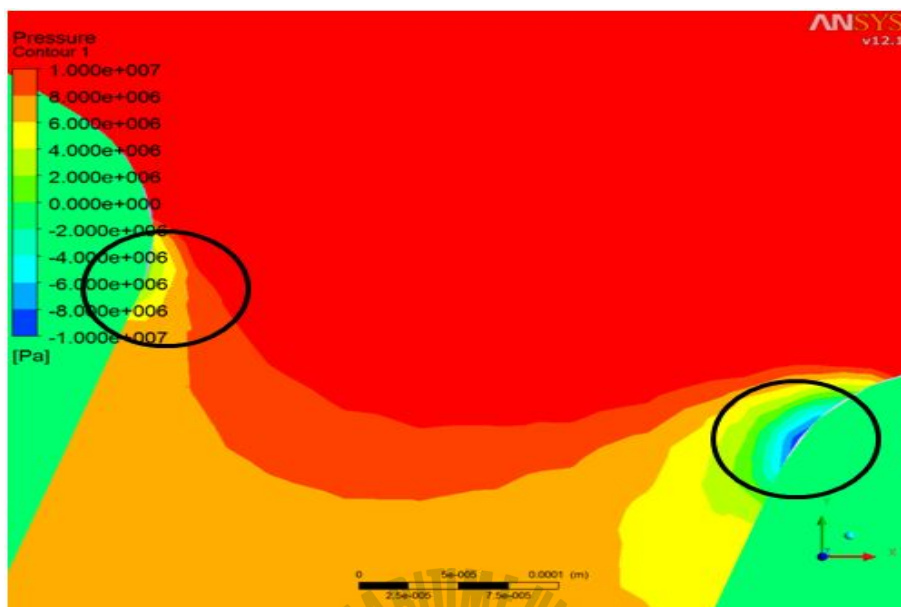
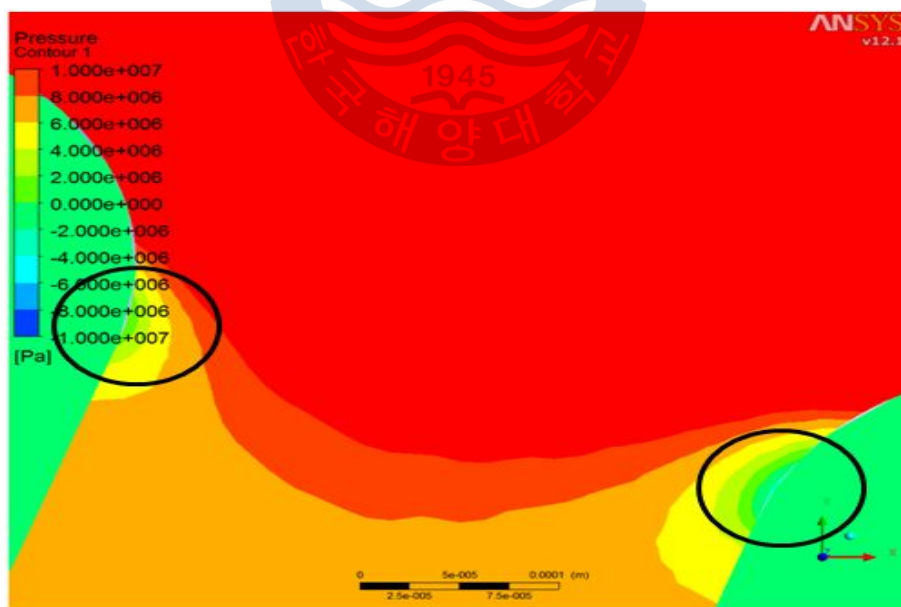


Fig. 3.48 (a) Curvature radius of 0mm

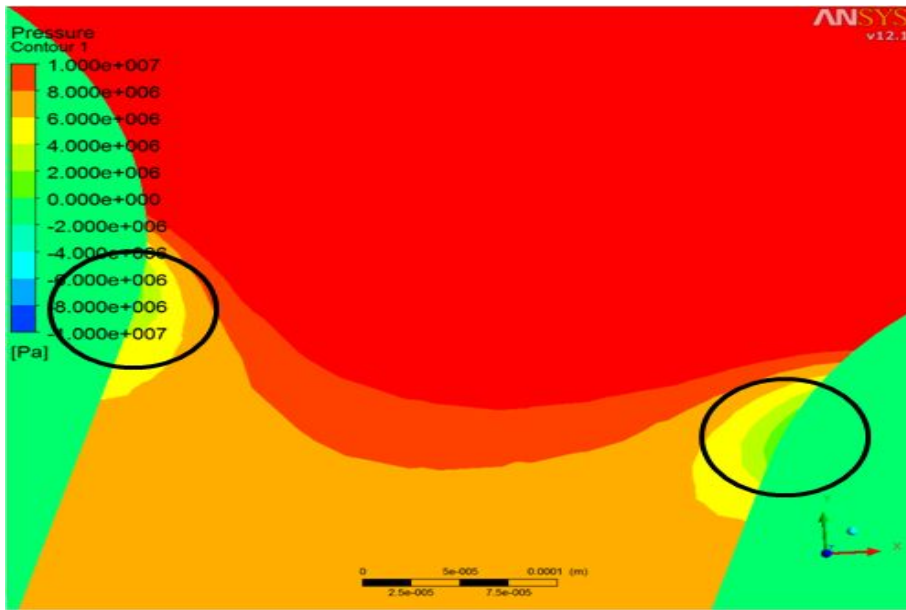




(b) Curvature radius of 0.1mm



(c) Curvature radius of 0.15mm



(d) Curvature radius of 0.2mm

Fig. 3.48 Variation of negative pressure in each curvature radius at nozzle

### 3.4.2 유속 및 유량의 변화

Fig. 3.49는 노즐 곡률반경 크기에 따라 노즐의 유체가 흐르는 입구에서 출구 홀 부분까지의 평균유속을 나타낸 것이며 Fig. 3.50은 평균유속을 보기 쉽게 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 보면 곡률 반경이 없는 경우가 유속이 가장 느리며 곡률 반경 크기가 0.1mm 가 되면서 유속이 증가하다가 0.15mm에서 0.2mm로 가면서 거의 일정해지는 경향을 볼 수 있다.

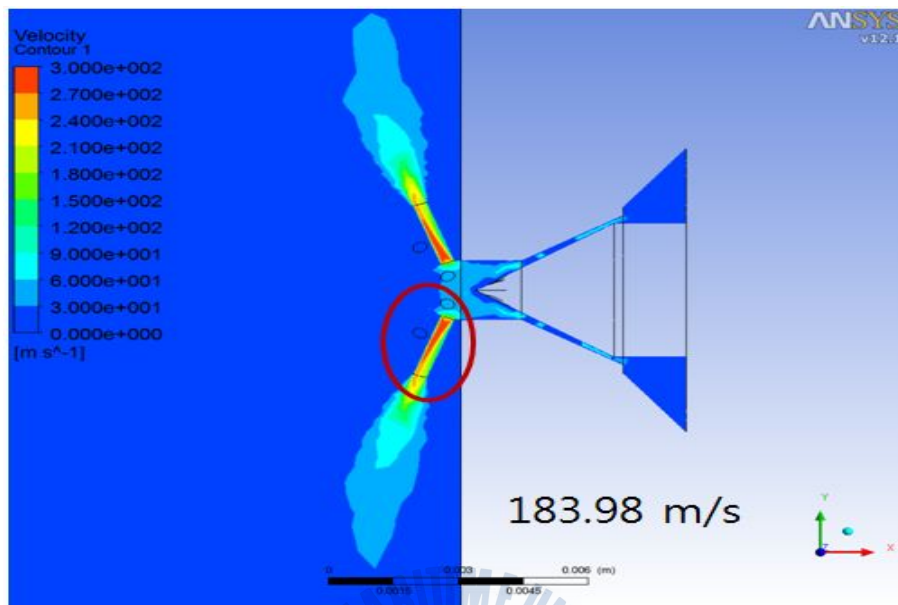
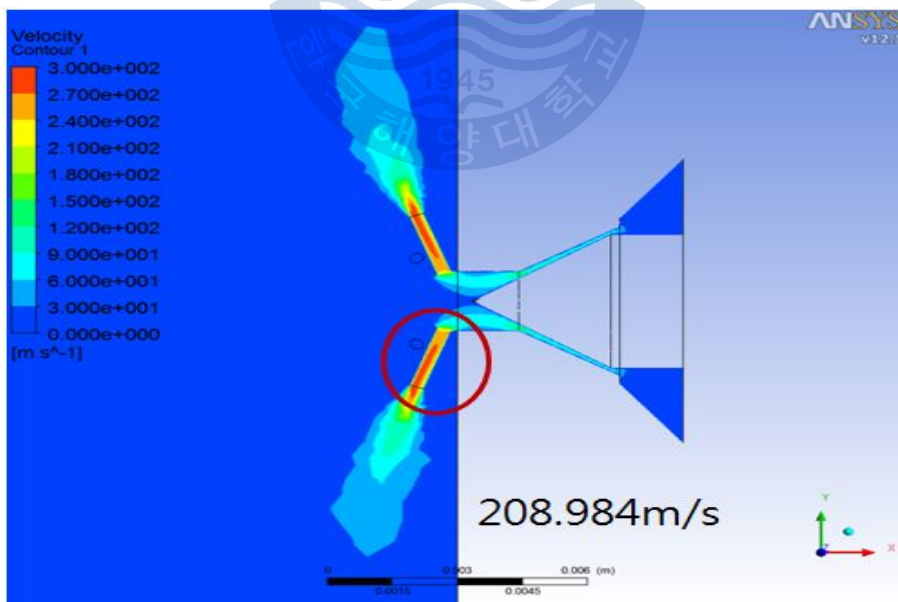
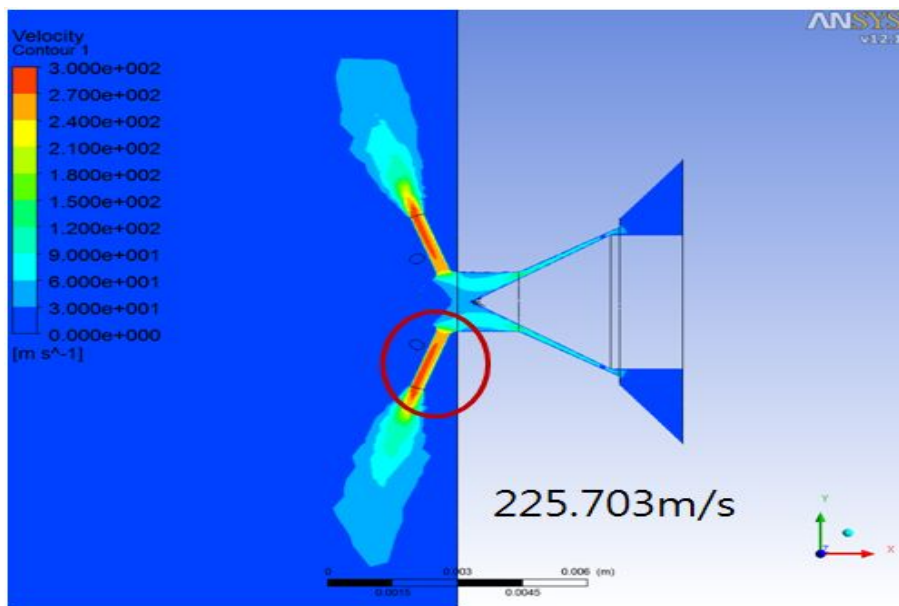


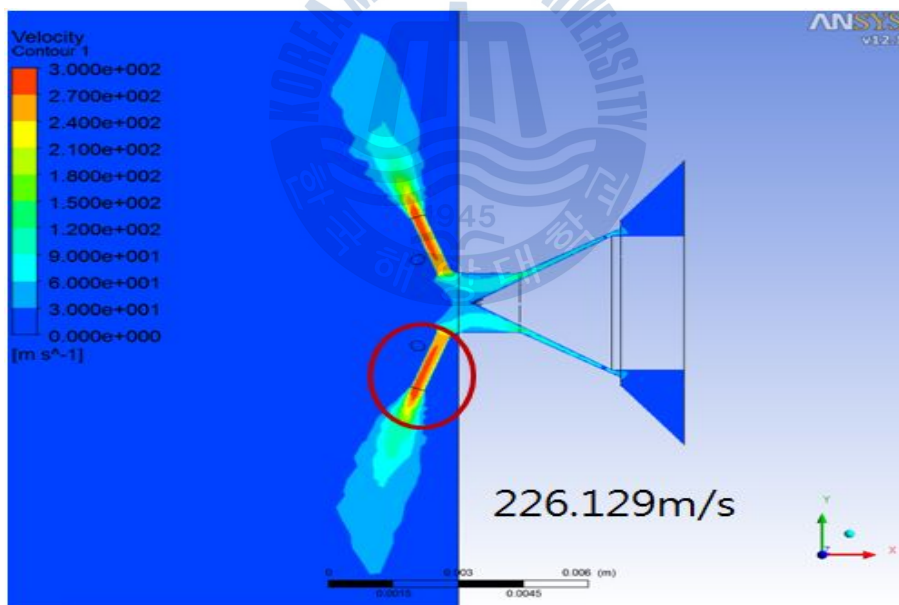
Fig. 3.49 (a) Curvature radius of 0mm



(b) Curvature radius of 0.1mm



(c) Curvature radius of 0.15mm



(d) Curvature radius of 0.2mm

Fig. 3.49 Variation of passage flow velocity in each curvature radius at nozzle

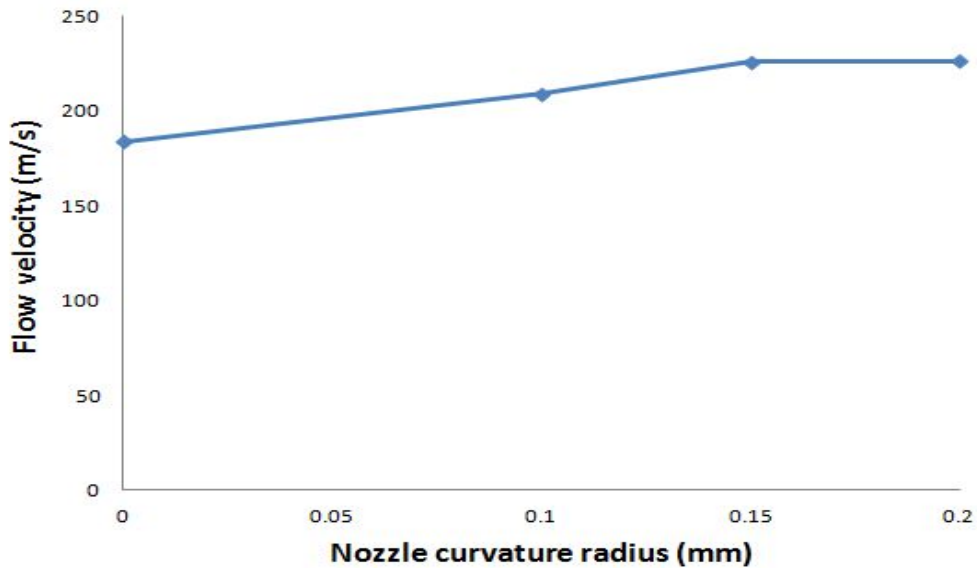


Fig. 3.50 Graph of passage flow velocity in each curvature radius at nozzle

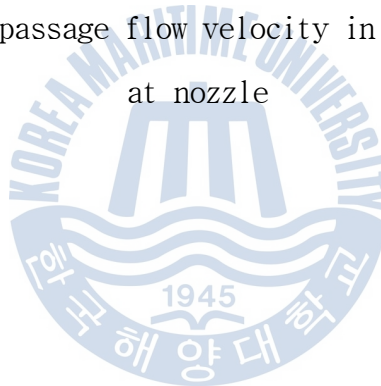


Fig. 3.51은 노즐 곡률 반경 크기에 따라 노즐 출구 단면의 유속과 유량을 나타낸 것이다. Fig. 3.52는 출구의 유속을 그래프로 나타낸 것이다. 출구에서는 곡률 반경이 없는 경우가 가장 유속이 느리며 0.1mm가 되면서 유속이 증가하여 0.15mm, 0.2mm가 되면서 유속이 거의 일정해진다. Fig.3.53은 출구에서 연료의 질량유량을 그래프로 나타낸 것이다. 유량의 경우도 유속과 비슷한 경향을 보이는데 곡률 반경이 없는 경우가 가장 유량이 적으며 0.1mm가 되면서 약간 증가하며 0.15mm, 0.2mm로 가면서 거의 일정해진다.

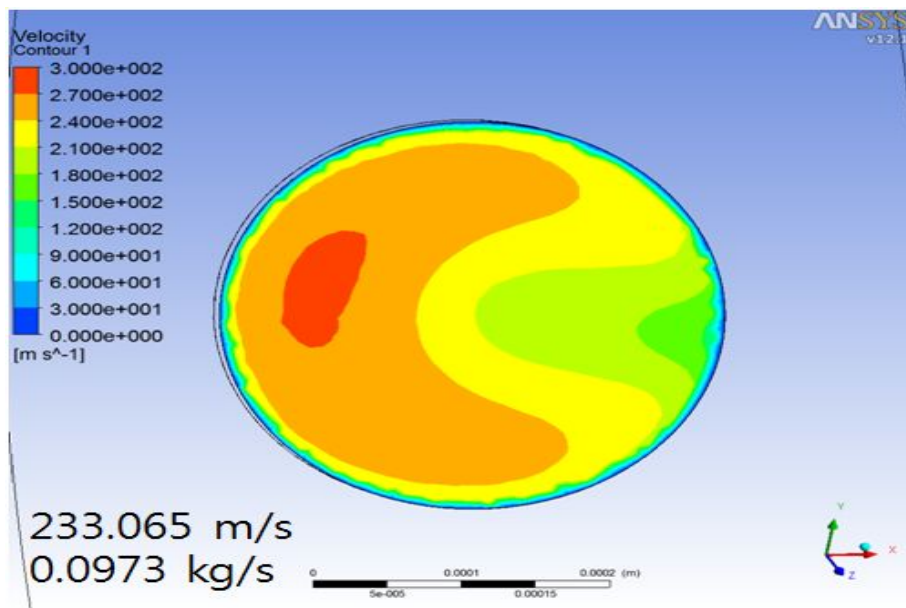
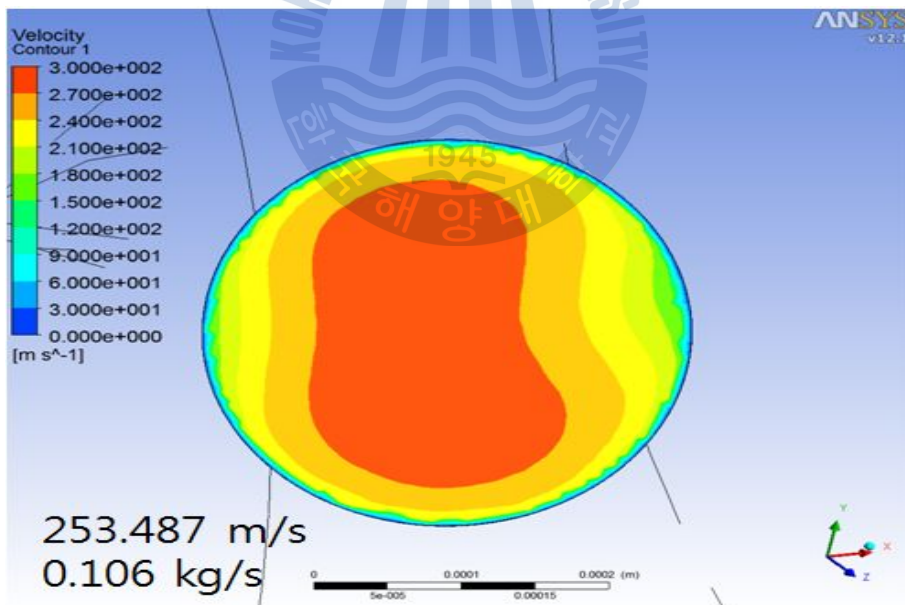
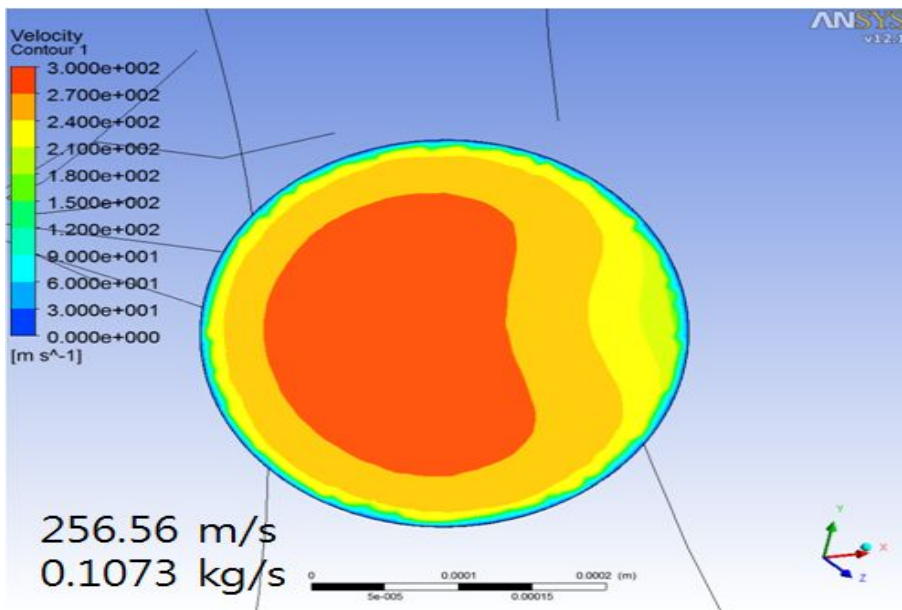


Fig. 3.51 (a) Curvature radius of 0mm

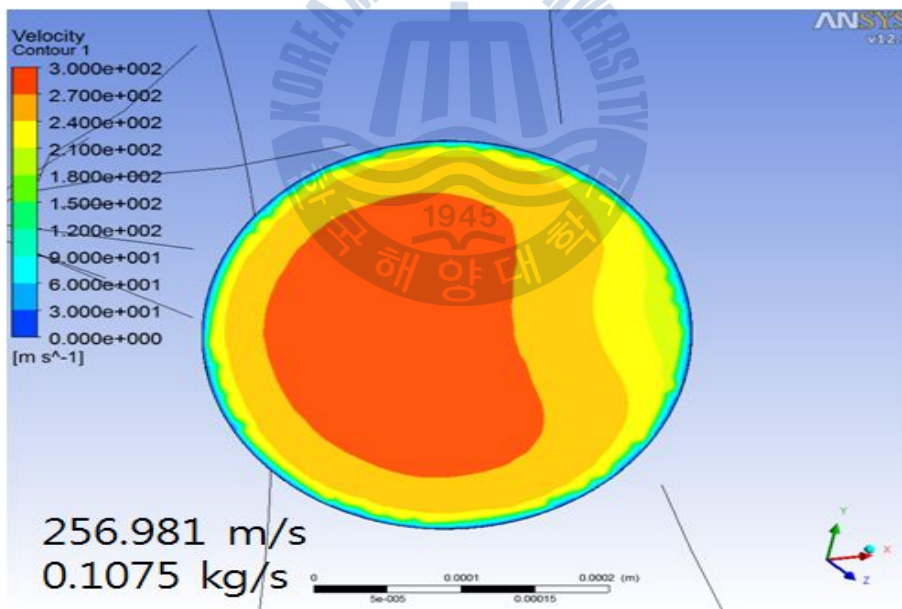


(b) Curvature radius of 0.1mm





(c) Curvature radius of 0.15mm



(d) Curvature radius of 0.2mm

Fig. 3.51 Variations of outlet flow velocity and mass flow rate in each curvature radius at nozzle



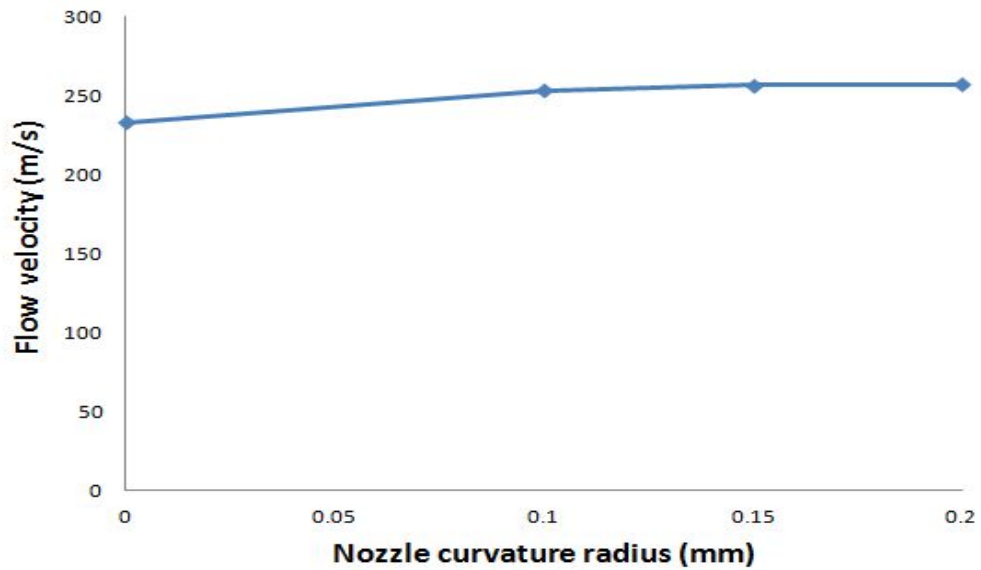


Fig. 3.52 Variation of outlet flow velocity in each curvature radius at nozzle

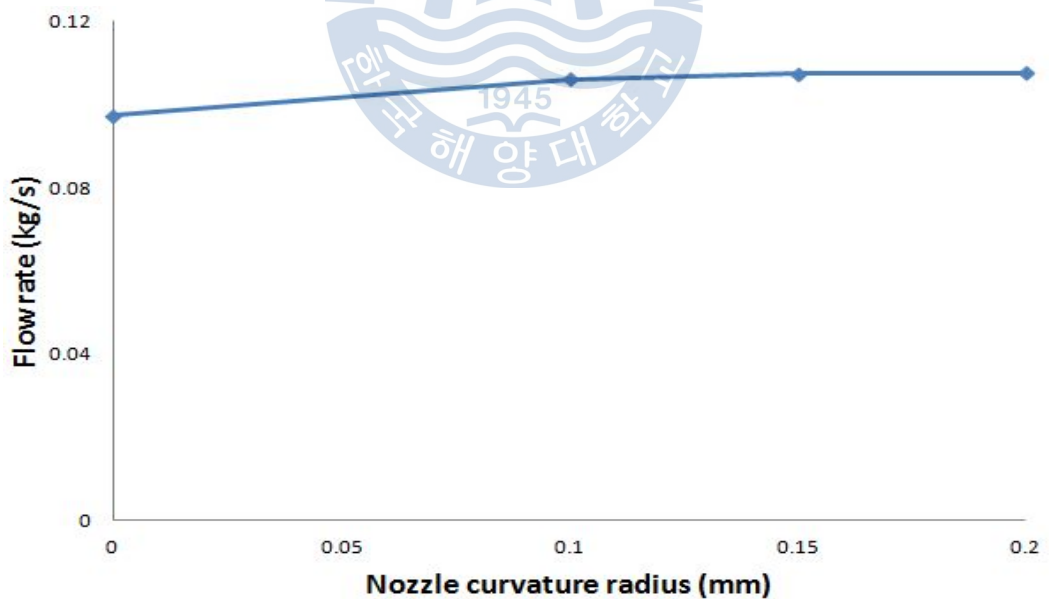


Fig. 3.53 Variation of outlet mass flow rate in each curvature radius at nozzle

Fig. 3.54는 곡률 반경 부분의 유동을 보기 위하여 속도 벡터로 나타내었다. 곡률 반경이 없는 경우는 최대 유속이 296m/s를 보이며 유동이 벽면을 따라 큰 각도로 중심부로 집중 되는 경향을 볼 수 있다. 곡률반경 크기가 0.1mm인 경우는 최대 유속 294m/s를 보이며 유동이 벽면을 타고 약간 부드럽게 들어오며 중심부로 집중 되는 현상이 곡률 반경이 없는 경우보다 적다. 곡률 반경 크기가 0.15mm인 경우는 최대 291m/s의 속도를 보이며 유동의 경우는 벽면을 따라 부드럽게 유입되며 중심부로 유동이 집중 되는 현상이 거의 나타나지 않고 골고루 분포 된다. 곡률 반경 크기가 0.2mm인 경우는 최대 유속은 291m/s로 곡률 반경 크기가 0.15mm인 경우와 같으며 유동의 경향 또한 비슷하지만 유체가 유입되는 양이 다른 경우에 비해 가장 크다. 이상의 분석 결과 곡률 반경 크기가 크면 클수록 유동이 중심부로 집중 되는 현상이 줄어들면서 골고루 분포가 되며 유입되는 양이 커지는 것을 알 수 있다.

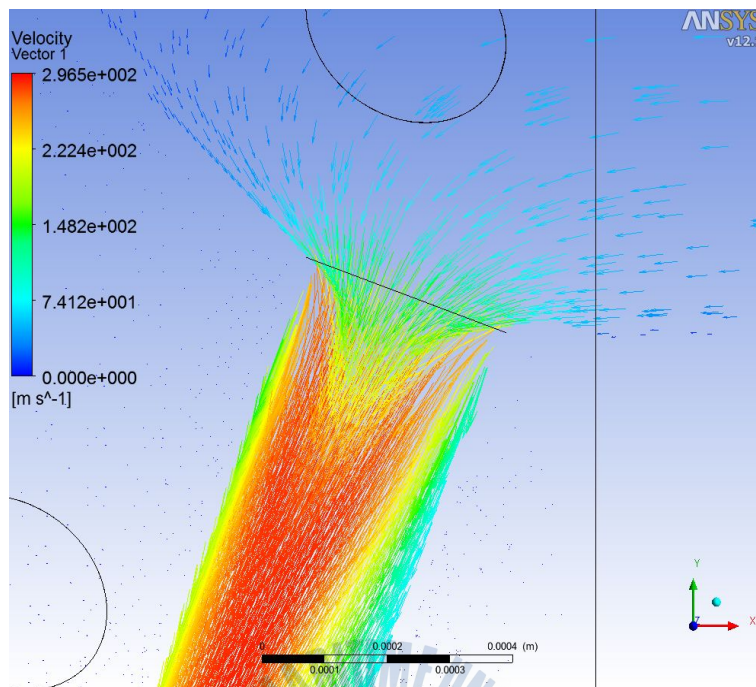
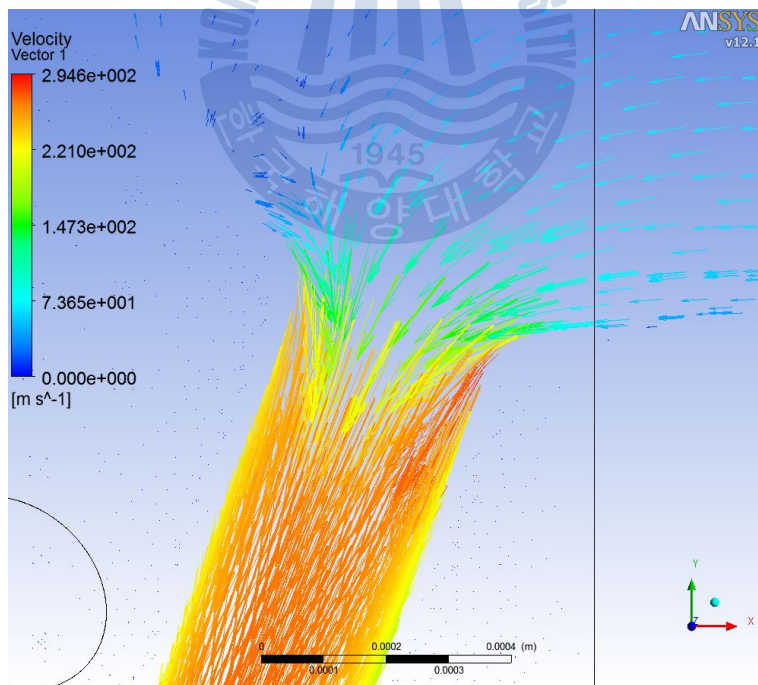
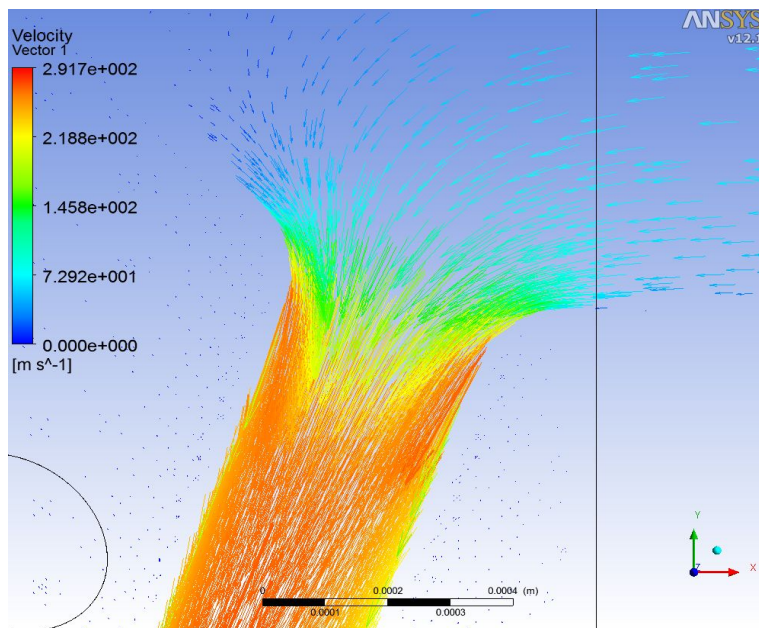


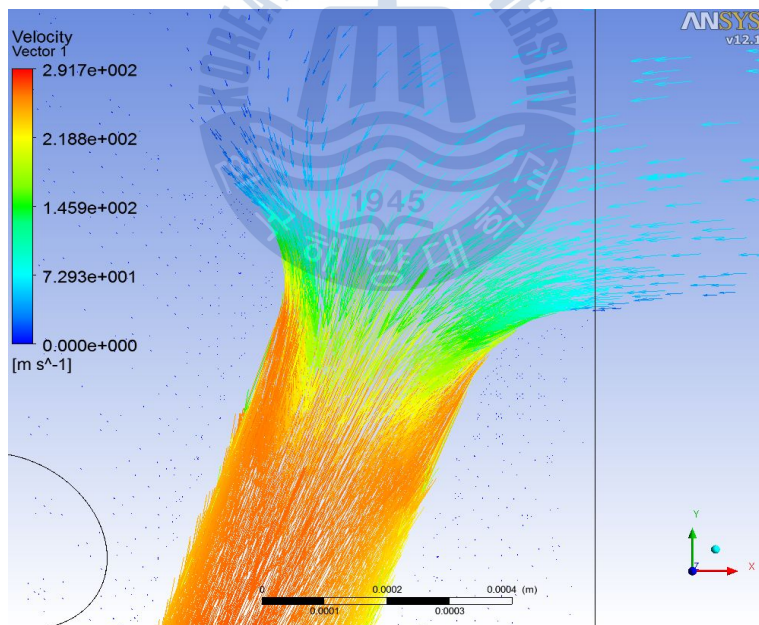
Fig. 3.54 (a) Curvature radius of 0mm



(b) Curvature radius of 0.1mm



(c) Curvature radius of 0.15mm



(d) Curvature radius of 0.2mm

Fig. 3.54 Variation of flow vector in each curvature radius  
at nozzle

### 3.4.3 계산 결과 요약

노즐 입구의 곡률 반경 영향을 분석하기 위하여 기하학적으로 가능한 최대 반경인 0.2mm를 최대 조건으로 하는 계산을 수행하였으며, 실제 노즐의 가공 시에는 이 부분에 정확한 크기로 정밀하게 가공하는 것일 불가능하였기 때문에 시뮬레이션으로 대체 하였다. 결과를 요약 하면 곡률 반경 크기에 따른 노즐 시뮬레이션 해석 결과 유체가 흐르는 노즐 통로 부분에서의 전체 압력 변화는 곡률 반경 크기가 커짐에 따라 압력이 서서히 증가하는 경향을 보이고, 노즐이 분사 되는 출구 면에서의 전체 압력 또한 곡률 반경 크기가 커짐에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 부압의 크기 또한 곡률 반경의 크기가 크면 클수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 통로 부분에서의 유속도 곡률 반경의 크기가 크면 유속 또한 빨라지며 분사되는 출구 면에서의 유속과 유량 또한 증가하는 경향을 알 수 있다. 곡률 반경 부분의 유동 또한 크기가 커지면 유동의 양이 많아지며 유동의 분포 또한 고르게 분포 된다. 이상의 분석 결과 노즐의 벽면에 곡률 반경을 주게 되면 그 만큼 부압의 크기가 감소하기 때문에 압력과 유속 그리고 유량이 증가하는 것으로 사료된다.

## 제 4 장 결론

MDT L27/38 연료 분사용 노즐의 형상을 입구는 곡률 반경을 0에서 0.2mm 까지 하였으며 출구는 각도를 0도에서 90도까지 변경하여 분사 특성을 실험 및 계산에 의하여 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 분사 압력 특성 : 노즐 내부 평균 압력은 노즐 출구 각도에 따라 변화하였으며 0도에서 높은 압력을 나타내며 30도와 60도에서 낮아진 후 90도에서 다시 증가하는 경향을 보였다.

(2) 분사 니들 거동 : 캠 회전 속도에 따라 약간의 차이는 있지만 출구 각 0도에서 니들의 단힘이 가장 늦으며 30도와 60도에서 전반적으로 빨리 닫힌다.

(3) 분사 유량 : 노즐 입구의 곡률 반경이 클수록 분사유량이 증가하였으며 노즐 출구 각도의 변화에서는 30도와 60도의 경우가 모든 캠 회전 속도에서 많은 분사 유량을 나타낸다.

(4) 분무 거동 : 노즐 출구의 각도가 0도인 경우 분무의 거동은 유동 영향을 크게 받지 않고 전방으로만 진행 하였으며 분무 확산도 제한적 이었다. 출구 각이 30도와 60도인 경우 노즐 출구 선단에서 강한 공기의 유입과 함께 와류가 발생하였으며 분무도 크게 확산 되었다. 출구 각이 90도로 커진 경우 이러한 와류 유동이 줄어들면서 0도인 경우와 같이 전방으로 진행됨을 나타내었다.



이상 결과를 종합하면 이 노즐 입구 곡률 반경 크기 변경은 0.15mm에서 0.2mm 사이로 설계를 하면 부압이 줄어들고 분무의 거동과 유량이 효과적일 것이라 사료되며, 노즐 출구 각도에 따른 실험과 시뮬레이션 결과는 30도와 60도 사이인 경우가 분사압력, 니들 거동, 분사유량, 분사각, 분무폭 등이 가장 양호한 것으로 판단된다.





## 참고문헌

- [1] 윤옥현, 김병석, 류승협, 김기두, 하지수, “연료분사 노즐 형상이 선박용 중형 디젤 엔진의 NOx에 미치는 영향 연구” 한국마린엔지니어링학회 2005년도 후기학술대회 논문집, Nov, 01, pp.13-14, 2005.
- [2] 김동건, 김문경, 윤순현, “이중제트에서 노즐과 노즐사이의 각도 변화에 따른 유동 특성” 한국마린엔지니어링학회지, v.32 no.8 pp.1231 - 1239, 2008.
- [3] 차경세, 정우인, 박찬국, “분사 노즐 분공경에 따른 디젤 엔진 연소실내 분무 거동에 관한 연구” , 한국자동차공학회논문집, v.8 no.3, pp.18 - 27. 2000.
- [4] F.J. Salvador, J.V. Romero, M.D. Rosello, J. Martinez-Lopez, "Validation of a code for modeling cavitation phenomena in Diesel injector nozzle", Elsevier Mathematical and computer Modeling no.52, pp.1123-1132, 2010.
- [5] F.J. Salvador, J.V. Romero, M.D. Rosello, "Influence of biofuels on the internal flow in diesel injector nozzles", Elsevier Mathematical and computer Modeling no.54, pp.1699-1705, 2011.
- [6] Sibendu Som, Anita I. Ramirez, Douglas E. Longman, Suresh K. Aggarwal, "Effect of nozzle orifice geometry on spray combustion, and emission characteristics under diesel engine conditions" Elsevier Fuel no.90, pp.1267-1276, 2011.
- [7] Acroumanis C., Gavaises M., Nouri J.M., Wahab E. and Horrocks R., “Analysis of the Flow in the Nozzle of a Vertical Multi-Hole Diesel Engine Injector” , SAE paper 980811, 1998.
- [8] Castleman Jr., R. A., “The Mechanism of the Atomization of Liquid” , J. Research Nat.Bur.Standards, Vol.6, pp. 369-376, 1931.

- [9] Schweitzer, P. H., “Mechanism of Disintegration of Liquid Jets” , J. Applied Physics, Vol.8, pp. 513-521, 1937,
- [10] 김인구, 두 개의 액류분무노즐에서 분사되는 이중분무의 특성에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위논문, 1989.
- [11] 구자예, 박장혁, 오두석, 정홍철 “연료노즐 내부유동 현상의 수치해석” , 대한기계학회논문집(B), 제20권 제6호, pp. 1971-1982, 1996.
- [12] Shimizu, M., Arai, M. and Hiroyasu, H., “Disintegrating Progress of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle” , JSME, Vol. 56, No. 528, pp. 2519-2525, 1990
- [13] Wang, X. F., Chin, J. S. and Lefebvre, A. H., “Influence of Gas-Injector Geometry on Atomization Performance of Aerated-liquid Nozzles” , International Journal of Turbo and Jet Engine, Vol. 6, pp. 271-291, 1989.
- [14] 하성업, 김홍열, 류구영, 구자예, “노즐분공내 유체충돌이 있는 디젤노즐의 유동 및 분무특성 연구” , 대한기계학회논문집(B), 제21권 제 12호, pp. 1635-1646, 1997.
- [15] 한동식, 김현규, 장영준, “노즐 형상비에 따른 캐비테이션 및 내부 유동 특성에 관한 수치적 연구” 한국액체미립화학회지, v.13, no.4, pp.200-205, 2008.
- [16] 박수환, 서현규, 이창식, “노즐 오리피스 형상 및 형상비가 디젤과 바이오디젤 연료의 노즐 내부 및 외부 유동특성에 미치는 영향” , 대한기계학회지, v.31, no.3, pp.264-272, 2007.
- [17] 정의준, 오상한, 손창호, “원형노즐 출구 유동장의 수치해석” , 유체기계저널, v.13, no.6, pp.13-18, 2010.
- [18] 김봉환, 류광현, 정은익, 조은만, 이정언, “아토마이징 노즐의 유동 및 성능해

석” , 한국기계가공학회지, vol.9, no.3, pp.42-48, 2010.

[19] 김유준, 박정우, 서이수, “이젝터의 노즐 형상이 흡입유량에 미치는 영향” , 유체기계저널, vol.12, no.6, pp.13-17, 2009.

[20] 김중근, 이지형, 장홍빈, “핀틀 노즐 유동장의 수치해석적 연구” , 한국추진공학회지, vol.13, no.2, pp.35-41, 2009.

[21] Tommaso Lucchini, Gianluca D'Errico, Daniele Ettorre, “ Numerical investigation of the spray-mesh-turbulence interactions for high-pressure, evaporating sprays at engine conditions", Elsevier International Journal of Heat and Fluid Flow, no.32, pp.285-297, 2011.

[22] 류성목, 차건중, 김덕줄, 박권하, “디젤연소실에서 새로운 충돌분무 형성에 대한 수치적 고찰” , 대한기계학회 B권, 제 22권 11호, pp. 1625-1634, 1998.

[23] 김만식, 장용석, 민경덕, “가시화용 디젤노즐에서의 캐비테이션 유동 특성 및 3차원 해석 연구” , 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집 pp. 1421-1426, 2002.

[24] Shuo Yin, Xiao-fang Wang, Wen-ya Li, "Computational analysis of the effect of nozzle cross-section shape on gas flow and particle acceleration in cold spraying", Elsevier Surface & Coating Technology, no.205, 2011.

[25] 윤욱현, 김기두, 하지수, “대형 디젤 엔진의 연료 분사 노즐 형상이 NOx 발생량 및 연료소비율에 미치는 영향 연구", 한국박용기관학회지, vol.28, no.7, pp.1123-1130, 2004.